



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Problemas de cobertura y diseño de rutas con
vehículos aéreos no tripulados
Covering and routing problems with unmanned
aerial vehicles

Autor

José Luis López Ramón

Director

María del Carmen Galé Pola

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2018



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. José Luis López Ramón

con nº de DNI 73000272C en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Grado _____, (Título del Trabajo)

Problemas de cobertura y diseño de rutas con vehículos aéreos no tripulados

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, a 31 de Agosto del 2018

Fdo: José Luis López Ramón

Problemas de cobertura y diseño de rutas con vehículos aéreos no tripulados

RESUMEN

El sector de los vehículos aéreos no tripulados (UAVs), también llamados drones, se encuentra en clara expansión, donde aplicaciones como el reparto de última milla o el traslado de muestras y medicamentos se abren paso entre otras ya asentadas como la filmación o la inspección de líneas eléctricas.

En España, con la publicación de una nueva legislación, el Real Decreto 1036/2017, aparecen nuevas posibilidades, como el vuelo nocturno o el sobrevuelo de ciudades y aglomeraciones de personas. Por otro lado, en marzo de 2018 se publicó el Plan Estratégico 2018-2021 para el desarrollo del sector, en el que se establecen los ejes e iniciativas para impulsar su crecimiento y allanar el terreno para una normativa futura que se adapte a las nuevas aplicaciones.

A nivel europeo, el Proyecto U-Space pretende sentar las bases de un sistema de gestión del tráfico aéreo que garantice la seguridad de los usuarios. Por tanto, ante cualquier operación realizada mediante vehículos aéreos se antoja necesario establecer previamente un plan de vuelo.

En la planificación de los vuelos, en el campo de la investigación operativa ya han aparecido en la literatura trabajos relacionados con el diseño de rutas de drones, la mayoría centrados en el reparto de paquetería, bien combinado con el transporte tradicional o bien de última milla en las ciudades.

En este Trabajo Fin de Grado (TFG), en una primera etapa se ha revisado la normativa y legislación vigente tanto en el contexto español como europeo y se ha analizado el sector para conocer los modelos de UAVs más actuales, con sus características y principales aplicaciones. Entre las aplicaciones posibles, tras valorar varias alternativas, se decidió estudiar el uso de los UAVs en situaciones de aislamiento por frío en una zona geográfica de difícil acceso en la provincia de Teruel.

En la segunda etapa del TFG, una vez adquiridos los conocimientos necesarios para la formulación de modelos de programación matemática en problemas de rutas de vehículos, se formulan tres modelos matemáticos. Desde un primer modelo básico, conocido en la literatura, se extiende a dos nuevos modelos matemáticos que incorporan las características específicas del sistema bajo estudio. El primero de ellos considera el consumo de batería o combustible de los drones, lo que lleva a una reducción notable de las soluciones factibles del problema. Por ello, se presenta el tercer modelo, en el que se considera la recarga de los drones en estaciones habilitadas para ello. Se han considerado dos posibles funciones objetivo: minimizar la suma de todos los tiempos de distribución o minimizar la máxima duración de una ruta.

En una tercera etapa, un estudio de la provincia de Teruel permite seleccionar un conjunto de localidades que pueden integrarse en una red de envío mediante drones de mercancía urgente. Todas estas localidades son potenciales de permanecer aisladas por periodos de tiempo de diferente duración. Delimitando así, una zona de cobertura por el sistema de UAVs conforme a la legislación vigente.

Una vez implementados los modelos en el software de optimización CPLEX Studio, se obtienen las rutas óptimas para los drones bajo escenarios cuya principal distinción es la duración del periodo de aislamiento, lo que deriva en la cantidad de demanda de mercancía que se ha de afrontar. En cada escenario atendiendo al tipo de demanda, se han seleccionado los modelos de drones según sus especificaciones técnicas. Conocidos estos parámetros se ha resuelto el modelo matemático que mejor ajustaba la situación real.

Finalmente, tras la realización de este TFG se concluye que a día de hoy existe la tecnología necesaria tanto para el envío de medicamentos como grandes cantidades de carga a zonas remotas, marcándose como una línea futura de investigación el estudio de rentabilidad de la utilización de drones frente al sistema convencional de helicóptero de emergencias.

Índice general

1. Introducción	6
1.1. Objetivo	6
1.2. Alcance	6
2. Análisis del sector de los vehículos aéreos no tripulados	8
2.1. Situación en España	8
2.1.1. Legislación	8
2.1.2. Plan Estratégico para el desarrollo del sector	9
2.2. Proyecto U-Space	12
2.3. Aplicaciones actuales y tendencias de futuro	13
3. Formulación del problema de rutas de drones	17
3.1. Introducción a la programación matemática	17
3.2. Revisión de la literatura en problemas de rutas de UAVs	19
3.3. Modelo matemático para el problema de rutas de drones sin considerar el efecto de la batería	20
3.4. Modelo matemático para el problema de rutas de drones considerando el efecto de la batería	23
3.5. Modelo matemático para el problema de rutas de drones considerando el efecto de la batería y estaciones de recarga	23
4. Aplicación del modelo a un caso real: envío de mercancía a localidades aisladas de Teruel	27
4.1. Motivación	27
4.2. Restricciones sobre el uso de UAVs en la legislación	28

	5
4.3. Parámetros de la zona de cobertura seleccionada	30
4.4. Diseño de rutas óptimas de los UAVs	33
4.4.1. Periodos cortos de aislamiento con demanda puntual de medicamentos	33
4.4.2. Periodos de duración media de aislamiento con demanda mixta de medicamentos y productos de primera necesidad	37
4.4.3. Periodos largos de aislamiento con alta demanda	41
5. Conclusiones	46
Bibliografía	48
Anexo I. Plan Estratégico para el desarrollo del sector civil de los drones en España 2018-2021	50
Anexo II. Implementación en CPLEX Studio de los Modelos Matemáticos	62
Anexo III. Especificaciones técnicas de los helicópteros no tripulados utilizados en la resolución de los modelos	70

Capítulo 1

Introducción

1.1. Objetivo

El objetivo del presente Trabajo Fin de Grado es el de introducirse en la formulación de modelos de programación matemática, concretamente en los problemas de optimización lineal entera mixta y así adquirir las destrezas de formular y programar problemas de cobertura y de diseño de rutas. Para ello se ha elegido el sector de los vehículos aéreos no tripulados, UAVs (por sus siglas en inglés, Unmanned Aerial Vehicles) o comúnmente llamados drones, que en los próximos años se augura va a ser un sector en expansión, tal y como se justifica en el segundo apartado de esta memoria. Por tanto, un segundo objetivo es la aplicación de los modelos habituales de rutas de vehículos en este sector particular y se va aplicar en un caso real. Se ha considerado el envío de mercancía a pueblos que por diferentes circunstancias puedan quedar aislados y se ha comprobado cómo se modifican las rutas a recorrer según las hipótesis asumidas por los modelos y las características de los puntos de demanda y los vehículos.

1.2. Alcance

Para la consecución de los objetivos, la estructura del documento se desarrolla como se indica a continuación.

En primer lugar, se realiza un análisis del sector de los drones para conocer la legislación que aplica en España, las perspectivas de futuro que se tienen en dicho sector, así como las aplicaciones que se están llevando a cabo y las que se están desarrollando para estarlo en el medio o largo plazo.

En segundo lugar, tras hacer una revisión de la literatura, se plantean tres modelos matemáticos de diseño de rutas. Un primer modelo básico que no considera el efecto del consumo de batería, otro modelo que añade la restricción correspondiente para considerar dicho consumo, y un último modelo más complejo que incorpora la posibilidad de recargar en estaciones habilitadas.

En tercer lugar, se plantea un caso práctico, el de la distribución de mercancía a pueblos aislados en la provincia de Teruel, donde se encuentra una zona de cobertura para el sistema de envío de acuerdo

a la legislación. Posteriormente, se calculan los parámetros de la red y se implementan los modelos matemáticos en CPLEX Studio, un software de optimización, donde se resuelve cada uno de los modelos en distintos escenarios, atendiendo a la tipología de la demanda y las características de las aeronaves.

Por último, se presentan las conclusiones obtenidas así como las líneas futuras de investigación.

En los anexos, se adjunta en primer lugar aquellas ideas relevantes del Plan Estratégico que han quedado fuera de la memoria. En segundo lugar, se adjunta el código correspondiente a la implementación en CPLEX Studio de cada uno de los tres modelos desarrollados, así como un ejemplo de fichero de parámetros de entrada. Por último, se incluyen las especificaciones técnicas de los UAVs empleados en el proceso de resolución de los escenarios.

Capítulo 2

Análisis del sector de los vehículos aéreos no tripulados

2.1. Situación en España

Los vehículos aéreos no tripulados fueron concebidos originalmente con fines militares. Desde hace un tiempo, esta tecnología se ha introducido en el sector civil, mayormente con fines recreativos y en tareas de filmación.

Como la mayoría de tecnología proveniente del ámbito militar, ya ha encontrado sus aplicaciones en la industria, donde es común el empleo de drones en la inspección de líneas eléctricas o en el control de inventarios en grandes almacenes.

2.1.1. Legislación

Actualmente, la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto queda regulada por el Real Decreto 1036/2017. Desde la entrada en vigor del mismo, es posible realizar vuelos nocturnos, sobrevolar zonas urbanas y sobre aglomeraciones de personas o volar en espacio aéreo controlado, siempre bajo las condiciones que se establecen en el documento. A continuación, se citan algunas de las claves que se recogen en el mismo y que atañen al caso real propuesto en el Capítulo 4 [1]:

“(...) este real decreto establece el marco jurídico definitivo aplicable a la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto (RPA) no sujetas a la normativa de la Unión Europea, tal es el caso de las aeronaves pilotadas por control remoto (RPA) de masa máxima al despegue inferior a los 150 kg y las de masa máxima al despegue (...) destinadas a operaciones de aduanas, policía, búsqueda y salvamento, lucha contra incendios, guardacostas o similares”.

“(...) las denominadas aeronaves autónomas, cuyo uso en el espacio aéreo español y en el que España es responsable de la prestación de servicios de tránsito aéreo no está permitido”.

“(...) el uso de aeronaves pilotadas por control remoto (RPA) requerirá, en todo caso que su diseño y características permitan al piloto intervenir en el control del vuelo, en todo momento. El piloto remoto será, en todo momento, el responsable de detectar y evitar posibles colisiones y otros peligros”.

“El operador deberá establecer un área de protección para el despegue y el aterrizaje, de manera que en un radio mínimo de 30 m no se encuentren personas que no estén bajo el control directo del operador, salvo en el caso de aeronaves de despegue y aterrizaje vertical, en cuyo caso el radio podrá reducirse hasta un mínimo de 10 m”.

“Las aeronaves pilotadas por control remoto (RPA) deben operar de día (...) La realización de vuelos nocturnos requerirá la autorización expresa de la Agencia Estatal de Seguridad Aérea”.

“Cuando conforme a la legislación aplicable en relación con el deber de colaboración de los ciudadanos ante situaciones de grave riesgo, catástrofe o calamidad pública, las autoridades públicas responsables de la gestión de tales situaciones requieran la colaboración de los operadores habilitados conforme a lo previsto en este capítulo para el ejercicio de operaciones aéreas especializadas, éstos podrán realizar vuelos que no se ajusten a las condiciones y limitaciones previstas en este real decreto. En caso de que estos vuelos hayan de realizarse en espacio aéreo controlado, en una zona de información de vuelo, incluida la zona de tránsito de aeródromo o dentro de las zonas de protección establecidas en el artículo 23 ter.3, letra b), del Real Decreto 552/2014, de 27 de junio, el operador habrá de coordinarse previamente con el proveedor de servicios de tránsito aéreo correspondiente”.

Los sistemas de aeronaves pilotadas por control remoto (RPAS) deberán cumplir con los siguientes requisitos: identificación matriculación, aeronavegabilidad y requisitos del enlace de mando y control.

Por otro lado, quedan excluidos parcialmente del Real Decreto las operaciones atribuidas a las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad, quienes serán los encargados de garantizar la seguridad de las operaciones

En cualquier caso, se puede comprobar que la nueva regulación otorga flexibilidad al uso de UAVs.

2.1.2. Plan Estratégico para el desarrollo del sector

La reciente publicación del Plan Estratégico para el desarrollo del sector civil de los drones en España 2018-2021, muestra la expansión en la que se encuentra el sector. Tras hacer una revisión de la situación actual y las perspectivas de futuro, el Plan plantea cuatro ejes estratégicos, entre los que destacan el desarrollo de la normativa futura y el impulso al desarrollo empresarial del sector [2].

En lo que sigue, se va a hacer un recorrido por el plan, destacando sus puntos más destacados.

En primer lugar, es conveniente conocer qué tipos de drones existen. En la Figura 2.1 se muestran algunos de ellos. En la actualidad, los drones multirrotor son los más extendidos en el sector civil, estando los de ala fija más orientados al ámbito militar por sus mayores distancias de vuelo y duración. Otro de los motivos por los que no son comunes los drones de ala fija es su despegue horizontal, ya que requieren de grandes distancias para ello.

Aunque el plan no los contempla, los helicópteros no tripulados son idóneos para el traslado de gran cantidad de carga, encontrando a día de hoy en el mercado multitud de modelos completamente autónomos. Por contra, requieren de mayor mantenimiento que los anteriores.

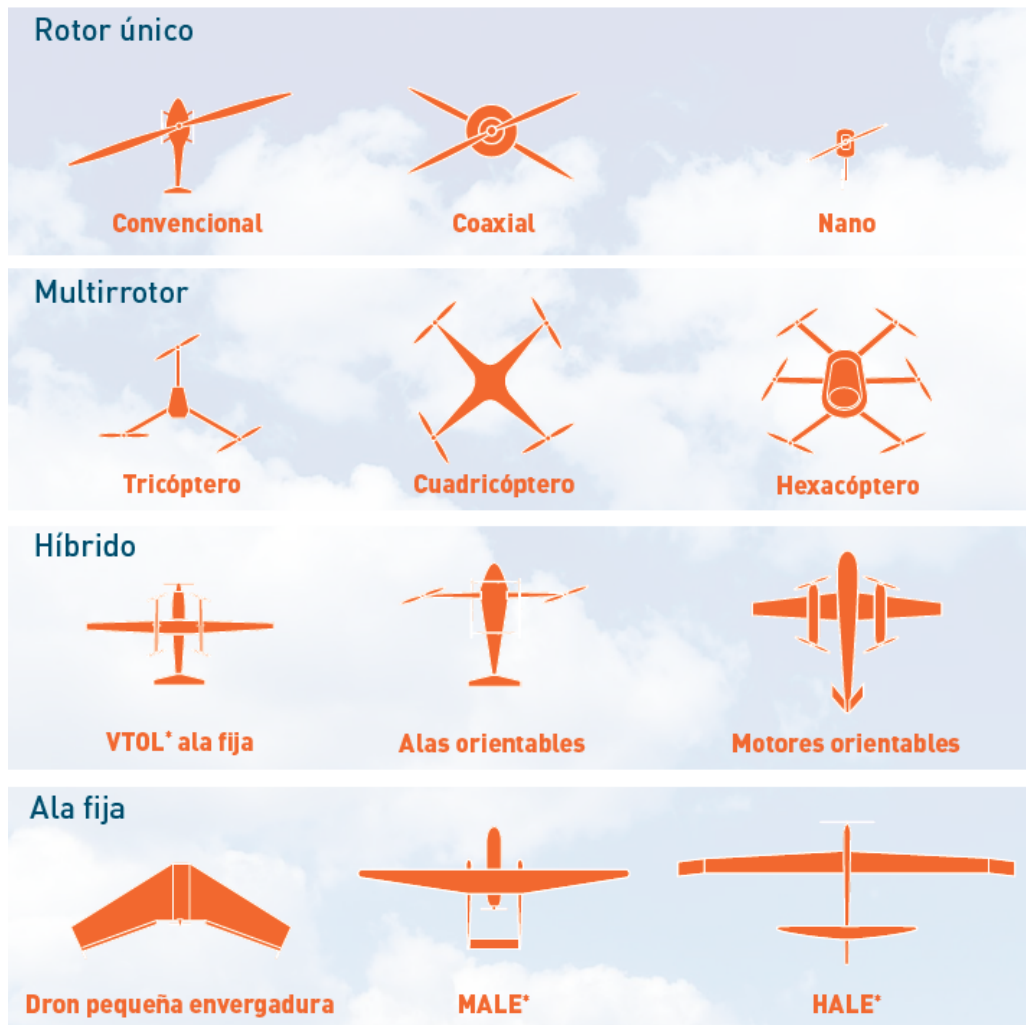


Figura 2.1: Tipologías de drones atendiendo a su arquitectura. Fuente: [2].

En la introducción al capítulo se han comentado algunas de las aplicaciones actuales, el plan recoge otras como levantamientos topográficos, gestión del riego en agricultura o control de actividades no permitidas. En la Figura 2.2 se pueden ver aquellas aplicaciones que ya están asentadas (o muy próximas a ello), así como aquellas que se espera lo estén en el medio o largo plazo. En la Sección 2.3 se comentarán algunas, especialmente las relacionadas con la pequeña paquetería y las de seguridad y emergencias.

Aunque en el siguiente capítulo se trata el tema, el plan también menciona las intenciones que tiene el país junto con el resto de Estados miembros de la Unión Europea en materia de seguridad. Concretamente, en el plan se proponen tres categorías de operaciones según el riesgo que conllevan: abierta (riesgo bajo), específica (riesgo medio) y certificada (riesgo alto), quedando estas dos últimas bajo la jurisdicción de las autoridades aeronáuticas.

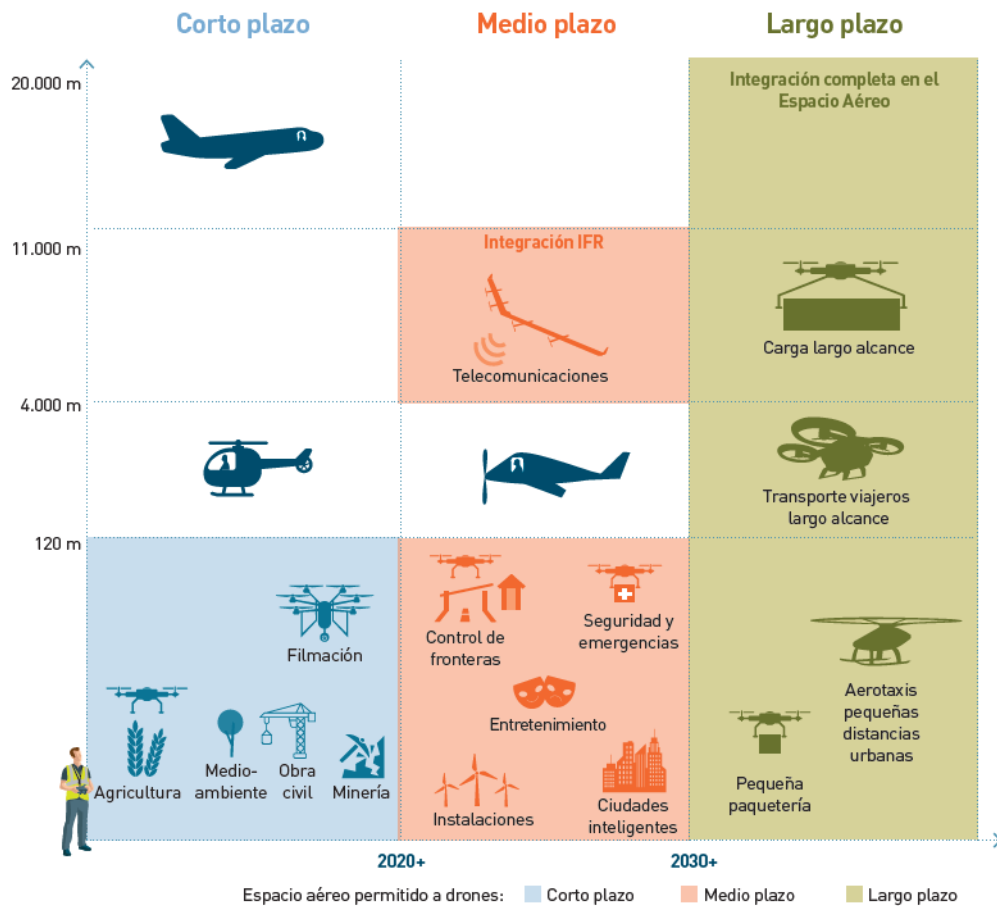


Figura 2.2: Evolución posible del uso compartido del espacio aéreo. Fuente: [2].

El siguiente bloque se centra en las cifras del sector. Reafirmando lo que se comentó acerca de la aparición de los drones en el ámbito militar, la Figura 2.3 muestra cómo este uso ha quedado relegado a un segundo puesto en favor del civil, que casi duplica el número de drones en este tipo de aplicaciones.

Entre ellas, las de paquetería junto a las de agricultura de precisión están en el segundo puesto de inversión de fondos a fecha de 2017, con 56 millones de dólares cada una. Únicamente le preceden las empresas horizontales, aquellas que ofrecen más de un servicio, con 177 millones. En esta línea, España está tercera en el ranking de operadores comerciales registrados, con una cuota del 16 %, detrás de Polonia (17 %) y Francia (22 %).

Por otro lado, con una visión a largo plazo, se espera un volumen de negocio anual en España de 1.220 millones de euros en 2035, con 11.000 puestos de trabajo. Asimismo, para 2050 se tiene una previsión de flota de drones de uso profesional de 53.500 unidades, aumentando así el volumen de negocio hasta los 1.520 millones de euros y creando 500 puestos de trabajo adicionales a los de 2035.

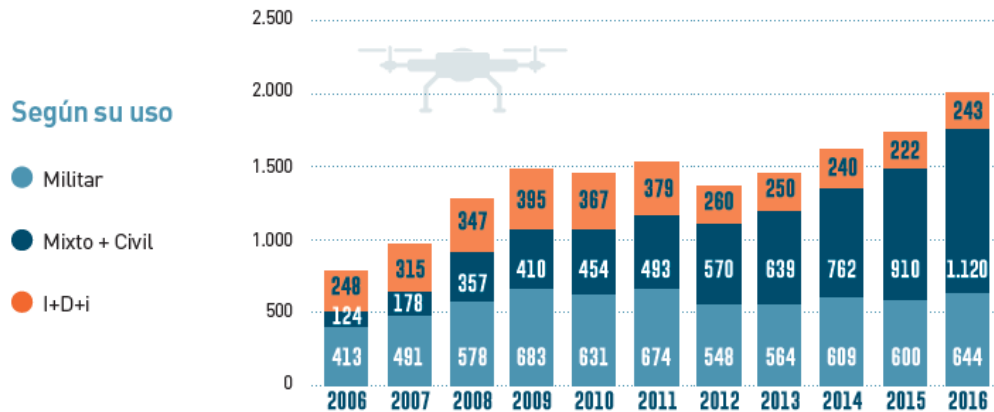


Figura 2.3: Evolución del número de modelos de drones según su ámbito de aplicación a nivel mundial. Fuente: [2].

Adicionalmente, en el Anexo I se muestran algunas páginas del plan que contribuyen a explicar cuál se espera sea el desarrollo civil de los drones en España en el futuro más cercano. Dicha información comprende: los proyectos de investigación y asignación de fondos a I+D+i, los 4 ejes estratégicos comentados al inicio de la sección, y las iniciativas que se proponen en el documento para la consecución de los mismos.

2.2. Proyecto U-Space

A nivel europeo, el SESAR Joint Undertaking (Single European Sky ATM Research), en alianza con la Unión Europea, trata de sentar las bases de un sistema de gestión del tráfico aéreo y que se ha denominado Proyecto U-Space. Toda la información relativa a este proyecto se recoge en el documento publicado por la oficina de la Unión Europea [3] y a continuación se describen algunos puntos. Entre los principios en los que está basado el proyecto se destacan los siguientes:

- “Garantizar la seguridad de los usuarios del espacio aéreo así como de la gente en tierra”.
- “Proporcionar una solución flexible y adaptable a cambios en la demanda, volumen, tecnología, modelos de negocio y aplicaciones”.
- “Habilitar una alta densidad de operaciones con drones automatizados bajo la supervisión de los operadores de los mismos”.

El Proyecto U-Space se pretende desarrollar en varias fases: una fase inicial (U1) de registro, identificación y geovallas, una fase (U2) de gestión de las operaciones (aprobación de planes de vuelo y rastreo), una tercera fase (U3) de operaciones más complejas con drones autónomos en áreas concurridas y una fase final (U4) de completa implantación con un alto nivel de automatización y digitalización. La primera fase se espera que concluya en 2019, así como las primeras pruebas de la fase U2.

Una descripción más visual de las funciones del U-Space así como de las fases de implantación, se recoge en castellano en el Plan Estratégico del sector (Figuras 2.4 y 2.5).

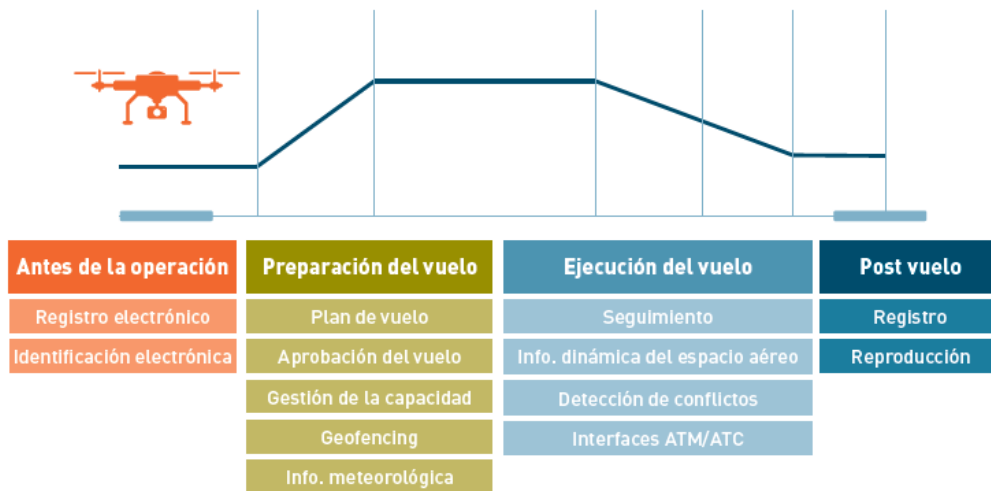


Figura 2.4: Descripción de las funciones del U-Space. Fuente: [2].

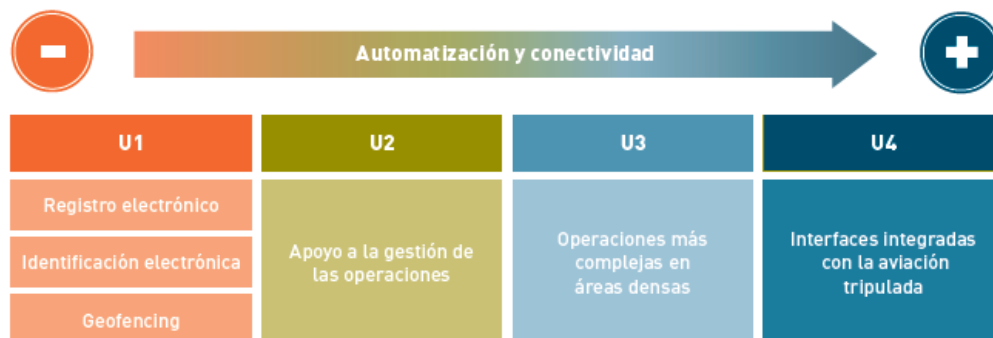


Figura 2.5: Fases de implantación del U-Space. Fuente: [2].

2.3. Aplicaciones actuales y tendencias de futuro

En logística, empresas como Amazon, DHL o UPS centran sus investigaciones en el uso de drones. En particular, Amazon, la gigante del comercio electrónico, trabaja para realizar envíos en menos de 30 minutos a sus clientes y ya ha conseguido realizar con éxito sus primeras pruebas en el Reino Unido [4]. En la Figura 2.6 se muestra el prototipo de dron utilizado en dichas pruebas. Esto, más conocido como reparto de última milla, tiene el objetivo de librarse del tráfico de las grandes ciudades, consiguiendo así una reducción notable del tiempo de distribución y por tanto ahorrando costes. En particular, Amazon plantea la ubicación de almacenes automatizados cercanos a las ciudades, de los cuales los drones entren y salgan sin intervención humana.



Figura 2.6: Dron prototipo de Amazon. Fuente: Amazon Prime Air.

Si Amazon concibe el reparto con drones con éstos saliendo directamente desde los distintos almacenes de los que disponga, UPS plantea un modelo mixto camión-dron (Figura 2.7). De este modo, unos clientes serían atendidos mediante el camión, y aquellos que sean de difícil acceso (por tráfico o por condiciones de las vías) serían atendidos mediante dron. Como se verá más adelante, el reparto de última milla es un objetivo destacado en el campo de la investigación.



Figura 2.7: Sistema de reparto de última milla prototipo de UPS. Fuente: UPS.

Aunque se están logrando grandes avances, lo cierto es que antes de que el envío masivo de paquetes se convierta en una realidad, hay ciertas cosas que resolver. La primera y más importante es superar la barrera legal, como se ha visto antes en el Plan Estratégico, este novedoso sistema de envío es algo que los gobiernos tienen en cuenta, pero no terminan de establecer unas reglas que lo permitan llevar adelante, al menos a corto o medio plazo.

Algo que también genera incertidumbre es la manera en la que se realizará la entrega final. En Estados Unidos o Reino Unido, las casas unifamiliares con jardines al aire libre son más comunes que en Europa,

donde la aglomeración de personas en grandes edificios hace que la recogida de los paquetes por parte de los clientes se antoje más complicada.

En España, las primeras pruebas de envío mediante drones están siendo llevadas a cabo por Correos, con el objetivo de facilitar el servicio en zonas de difícil acceso [5].

En el campo de la salud, el traslado de muestras con drones entre hospitales es ya una realidad. El hospital de Lugano (Suiza), en colaboración con Swiss Post (servicio postal del país) y Matternet (empresa tecnológica que ofrece soluciones con drones), inició las pruebas en 2017, y desde 2018 ya hace un uso regular de esta tecnología [6]. Más recientemente, se hizo lo propio entre hospitales en Zurich (Suiza), donde el dron empleado sobrevolaba directamente el lago Zurich, ahorrando un tiempo considerable frente al traslado convencional [7].

En cuanto a logística humanitaria, la empresa Zipline opera en África realizando 500 entregas al día, enviando productos médicos a voluntarios, clínicas y hospitales. Tienen un radio de servicio de 80 kilómetros, con lo que a diferencia de los casos anteriores, emplean drones de ala fija (Figura 2.8) [8].



Figura 2.8: Dron de ala fija empleado por Zipline. Fuente: CNET.

El rango de aplicaciones que permite la utilización de UAVs es bastante extenso, además de las ya comentadas, a continuación se presenta una lista adicional:

- Control de inventarios.
- Control del tráfico.
- Control fiscal.
- Extinción de incendios.
- Búsqueda y rescate.
- Transporte de personas.

Todas las aplicaciones comentadas, junto con un proyecto sólido de gestión del espacio aéreo como el U-Space, puede desembocar a largo plazo en la evolución de las ciudades a *Smart Cities* (ciudades inteligentes), dónde se tendría que convivir con drones volando continuamente por encima de la población (Figura 2.9).



Figura 2.9: Smart City. Fuente: [2].

Capítulo 3

Formulación del problema de rutas de drones

3.1. Introducción a la programación matemática

En la toma de decisiones acerca de la organización o planificación de un sistema, optimizar significa tomar aquellas decisiones que logren el mejor rendimiento del sistema bajo estudio. Abordar un problema de optimización supone llevar a cabo tres etapas: la definición del problema, la formulación matemática y la resolución. En una primera etapa tiene lugar la recolección de datos, que servirán para comprender el problema y sentar las bases del modelo matemático. Una vez definido el problema, el siguiente paso consiste en realizar la formulación matemática. Para ello, conviene familiarizarse primero con términos como variables de decisión, función objetivo, parámetros o restricciones y comprender su significado. La definición que propone [9] para cada uno de ellos se comenta a continuación.

Las variables de decisión representan las decisiones cuantificables que se han tomar, que una vez resuelto el problema toman un valor determinado. Una función de estas variables permite describir la función objetivo del problema, que puede variar según la naturaleza del mismo (por ejemplo, minimizar el tiempo necesario para visitar un conjunto de clientes o maximizar el beneficio de un proceso). Las restricciones, actúan sobre las variables de decisión o funciones de dichas variables, en forma de desigualdades o igualdades, con el fin de limitar el valor de las mismas. En general, la necesidad de optimizar surge cuando los recursos, como el tiempo o la materia prima, es escasa. Por último, pueden aparecer parámetros, constantes conocidas que contribuyen a definir el problema, tanto de las restricciones como de la función objetivo.

Con todo ello, en el proceso de resolución se determinan los valores de las variables de decisión tales que minimicen (o maximicen) la función objetivo, siempre sujeto a las restricciones. Por ejemplo, una formulación general del problema lineal es el siguiente:

$$\begin{array}{ll} \max_x & cx \\ \text{sujeto a:} & Ax \leq b \\ & x \geq 0 \end{array}$$

Cada conjunto de valores de las variables que verifican todas las restricciones se denomina solución factible. Es posible que un problema no tenga ninguna solución factible, y se dice que el problema no es factible. También puede haber varias soluciones factibles que proporcionan el mismo valor de la función objetivo y se dice que el problema tiene óptimo múltiple.

Cuando todas las funciones que aparecen en el problema de optimización son lineales y las variables de decisión toman valores reales no negativos, se dice que es un modelo de programación lineal. Este modelo es uno de los más conocidos y el método del simplex, algoritmo desarrollado por Dantzig, se consideró uno de los top 10 algoritmos del siglo XX. Sin embargo, en muchos problemas, como los modelos matemáticos que se proponen en este trabajo, algunas de las variables de decisión son enteras o binarias. Considerar variables binarias permite introducir en el modelo matemático disyunciones e implicación de restricciones, así como linealizar restricciones no lineales.

En este trabajo, centrado en el diseño de rutas para los UAVs, conviene destacar dos problemas de optimización ampliamente estudiados en la literatura: el problema del viajante o TSP (por sus siglas en inglés, Travel Salesman Problem) y el problema de rutas de vehículos o VRP (por sus siglas en inglés, Vehicle Routing Problem). En el primero, dada una serie de ciudades se quiere encontrar la ruta más corta que visite todas las ciudades una y solo una vez, tal y como haría un viajante de comercio. El VRP sigue una filosofía parecida, solo que en este caso se dispone de una flota de n vehículos que salen de un almacén, cada cliente ha de ser visitado una y solo una vez por un solo vehículo y debiendo encontrar la ruta óptima para cada uno de ellos.

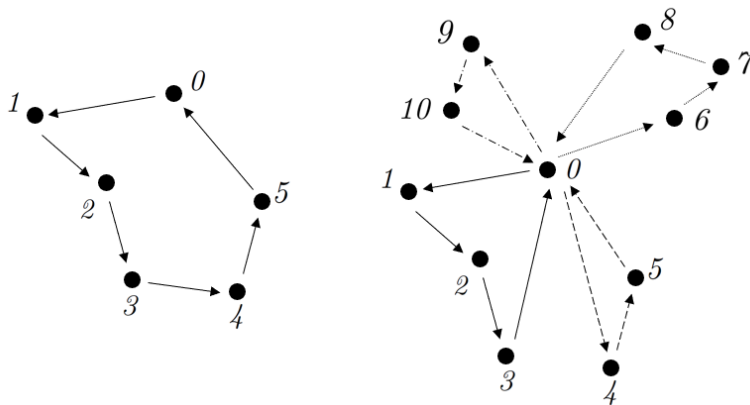


Figura 3.1: Ejemplo de problema TSP (izquierda) y de problema VRP (derecha). Fuente: Elaboración propia.

El VRP admite muchas extensiones, entre ellas añadir varios almacenes desde los que salen los vehículos, esto es, problemas *multidepot*, o permitir que un vehículo realice más de una ruta, se habla entonces de problemas *multitrip*.

3.2. Revisión de la literatura en problemas de rutas de UAVs

Una vez adquiridos los conceptos necesarios para leer y comprender correctamente los modelos de programación matemática que se encuentran en la literatura, se pone especial atención en aquellos que involucran UAVs.

Gran parte de ellos, como se ha comentado anteriormente, se centran en el estudio del reparto de última milla. En [10], se compara el método convencional de reparto mediante camión, frente el asistido mediante drones (Figura 3.2). Otros, sin embargo, estudian la optimización de la localización de las bases de lanzamiento para ofrecer la mayor cobertura y actuar con la máxima rapidez posible ante situaciones como un ataque al corazón, como en la referencia [11](Figura 3.3) o una llamada de emergencia [12].

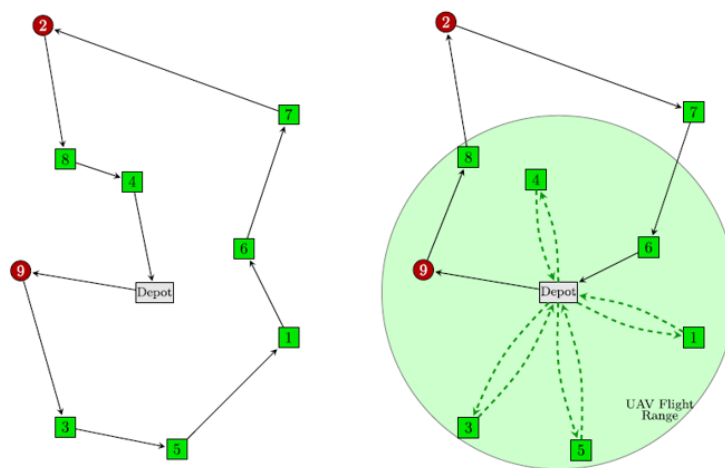


Figura 3.2: Solución al TSP con el método convencional (izquierda) y asistido mediante drones (derecha). Fuente: [10].

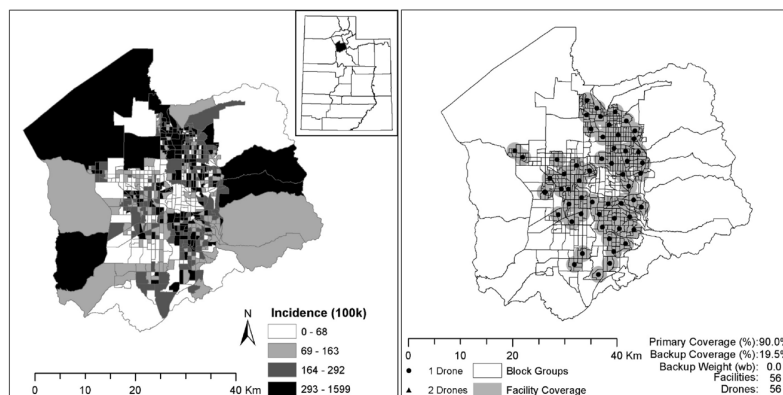


Figura 3.3: Número de incidentes en el condado de Salt Lake, Utah (izquierda) y localización de los drones de asistencia (derecha). Fuente: [11].

De los citados anteriormente, ninguno contempla el consumo de batería en el trayecto ni la posibilidad de habilitar estaciones de recarga. Siendo el campo de los vehículos convencionales eléctricos ([13], [14]) en los que más se está tratando la restricción que supone utilizar vehículos cuyo tiempo de uso viene limitado por la capacidad de la batería que utilizan.

En una línea diferente, también se están llevando a cabo estudios acerca de la emisión de gases de efecto invernadero propiciados por el sistema de envío de paquetes mediante drones y la comparación con el método convencional. En [15] se concluye que la implantación de este nuevo sistema de envío podría reducir la generación de estos gases, si bien para notar mejoras en el medio ambiente los fabricantes y las autoridades deberían limitar el tamaño de los aparatos.

En la literatura revisada no se ha encontrado la formulación de problemas de diseño de rutas que incluyan el efecto de la batería, así como aquellos pensados para recorrer mayores distancias y que necesiten de estaciones de recarga. Por ello, a continuación en este trabajo se proponen varios modelos matemáticos, que partiendo de un modelo básico, van aumentando la complejidad hasta considerar finalmente el consumo de batería y estaciones de recarga.

3.3. Modelo matemático para el problema de rutas de drones sin considerar el efecto de la batería

El sistema se representa como una red cuyos nodos son los clientes y el almacén desde donde despegan y aterrizan los drones. Los arcos representan las conexiones entre los nodos. Se considera un conjunto de C clientes que se define $cust=\{1,2,\dots,C\}$ y un depósito inicial desde donde despegan los drones. Para facilitar la formulación se ha duplicado el nodo almacén, de forma que cuando actúa como nodo origen se denota por 0 y cuando es el nodo final de una ruta se denota por $C+1$. Todos los drones salen y regresan al almacén. El conjunto de nodos que pueden ser origen de un arco se define como $V_0=\{0,1,2,\dots,C\}$ y el conjunto de nodos que pueden ser final de un arco como $V_F=\{1,2,\dots,C+1\}$. Asimismo, se dispone de m drones, siendo $K=\{1,2,\dots,m\}$ el conjunto de todos ellos. El objetivo es determinar la ruta de cada uno de los drones de forma que cada cliente con demanda sea visitado por un solo dron una sola vez para atender toda su demanda, cada dron salga y regrese al almacén y se minimice la suma de los tiempos empleados por todos los drones.

El modelo incluye además como parámetros o datos conocidos:

- la matriz de distancias entre nodos de la red c_{ij} (con $i \in V_0$ y $j \in V_F$),
- la demanda de cada cliente d_i , para todos $i \in cust$,
- la capacidad de carga de cada dron Q_k , $k \in K$,
- la velocidad de cada dron S_k , $k \in K$.

Se definen las siguientes variables de decisión:

- x_{ij}^k : variable binaria que representa si el dron k viaja desde i hasta j . Toma el valor 1 cuando lo hace y 0 en otro caso.

- y_i^k : variable binaria que representa si el dron k visita al cliente i . Toma el valor 1 cuando lo hace y 0 en otro caso.

En muchos problemas de optimización, en los que se plantea diseñar rutas, hay que añadir variables de decisión auxiliares para evitar lo que se denomina *subtours*. En la Figura 3.4 se han representado dos soluciones a un problema TSP en el que saliendo el vehículo de un almacén (nodo 0) se ha de calcular la ruta de longitud mínima que visite una y solo una vez a cinco clientes (nodos 1 a 5) y regrese al almacén. La solución de la parte izquierda de la figura verifica que de todos los nodos llega y sale un solo arco. Sin embargo, no es una solución factible porque incluye dos *subtours*. Por ello, se ha de añadir un conjunto de restricciones que no sean verificadas por aquellas soluciones que contengan *subtours* y que garanticen que las soluciones que las verifican cumplen que son un *tour*, como por ejemplo la solución de la parte de la derecha de la Figura 3.4.

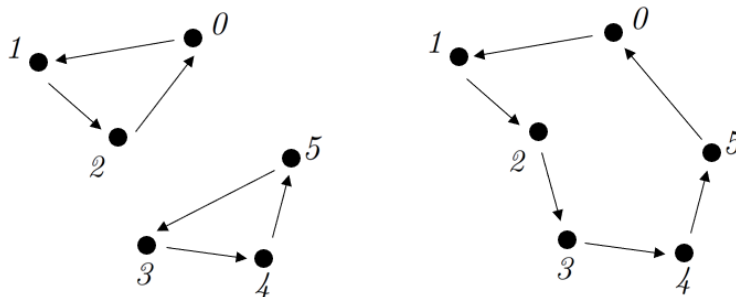


Figura 3.4: Ejemplo de solución no factible (izquierda) y de solución factible tras la eliminación de *subtours* (derecha). Fuente: Elaboración propia.

En la literatura se han considerado diferentes conjuntos de restricciones de eliminación de *subtours*. En este trabajo se han elegido las restricciones de tipo Tucker-Miller-Zemlin, que se incluyen más adelante y que consideran la definición de las siguientes variables de decisión:

- u_i : variable continua no negativa, $i \in \text{cust}$.

Una vez definidos los parámetros del problema y las variables de decisión se continúa con la formulación matemática del problema. La Ecuación 3.1 proporciona la función objetivo y se define como la suma de los tiempos que tardan en recorrerse todos los arcos que están activados, es decir, aquellos que atraviesan los drones. El tiempo de recorrido de cada arco (i, j) se ha calculado como el cociente entre la distancia entre los nodos que determinan el arco, c_{ij} y la velocidad el dron elegido para recorrer el arco S_k .

Las restricciones que han de verificar las soluciones para proporcionar una solución factible al problema de rutas de los drones son:

- La suma de las demandas de los clientes que atiende un dron no ha de superar su capacidad de carga (Ecuación 3.2). Se plantea una restricción de este tipo para cada uno de los drones $k \in K$.

- Se sale (Ecuación 3.3) y se entra (Ecuación 3.4) en cada cliente una y sola una vez y con un solo dron. Si un dron k no visita un cliente i , la variable $y_i^k = 0$ y entonces todas las variables $x_{ij}^k = 0$ para los $j \in V_F$ (Ecuación 3.3) o los $j \in V_0$ (Ecuación 3.4). Y si un dron k visita un cliente i , la variable $y_i^k = 1$ y una y solo una de las variables $x_{ij}^k = 1$ para los $j \in V_F$ (Ecuación 3.3) o los $j \in V_0$ (Ecuación 3.4), esto es, se accederá al cliente i con el dron k desde un solo cliente $j \in V_0$ (Ecuación 3.4) y se saldrá hacia un solo cliente $j \in V_F$ (Ecuación 3.3).
- Todos los clientes son atendidos por uno y solo un dron (Ecuación 3.5).
- Se eliminan las soluciones en las que el dron vaya del almacén como nodo origen al almacén como nodo destino sin pasar por ningún cliente (Ecuación 3.6).
- Los *subtours* no son soluciones factibles (Ecuación 3.7). Este es el conjunto de restricciones considerado para la eliminación de *subtours*.
- Las restricciones de las Ecuaciones 3.8 y 3.9 son desigualdades válidas, es decir, no son necesarias para restringir el valor de las variables de decisión y así proporcionar soluciones factibles del problema pero se sabe que se verifican por las soluciones factibles. Añadirlas implica una reducción notable del tiempo de cómputo. Representan que si un dron está activado ha de salir del almacén y que si no ha salido del almacén, no puede volver a entrar, respectivamente.

Con todo ello, la formulación del modelo queda como sigue:

Minimizar:

$$\sum_{i \in V_0} \sum_{j \in V_F} \sum_{k \in K} \frac{c_{ij}}{S_k} \cdot x_{ij}^k \quad (3.1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i \in cust} d_i \cdot y_i^k \leq Q_k, \forall k \in K \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in V_F, k \in K} x_{ij}^k = y_i^k, \forall i \in cust \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in V_0, k \in K} x_{ji}^k = y_i^k, \forall i \in cust \quad (3.4)$$

$$\sum_{k \in K} y_i^k = 1, \forall i \in cust \quad (3.5)$$

$$x_{0C+1}^k = 0, \forall k \in K \quad (3.6)$$

$$u_i - u_j + (C + 1) \cdot x_{ij}^k \leq C, \forall i \in V_0, \forall j \in V_F, \forall k \in K \quad (3.7)$$

$$\sum_{i \in cust} y_i^k \leq C \cdot \sum_{i \in cust} x_{0i}^k, \forall k \in K \quad (3.8)$$

$$\sum_{i \in cust} x_{iC+1}^k \leq \sum_{i \in cust} x_{0i}^k, \forall k \in K \quad (3.9)$$

El modelo anterior se puede extender a otros modelos que consideren otras restricciones sobre el conjunto de rutas. En este sentido, en el siguiente apartado se van a añadir restricciones para considerar

el efecto de la batería. También se pueden considerar otros objetivos para seleccionar la solución óptima entre las soluciones factibles. Por ejemplo, considerando que el objetivo consiste en minimizar el tiempo de la ruta más larga que es aquella que va a determinar el tiempo de finalización de la operación:

Minimizar:

$$\max_{k \in K} \sum_{i \in V_0} \sum_{j \in V_F} \frac{c_{ij}}{S_k} \cdot x_{ij}^k \quad (3.10)$$

La función objetivo (Ecuación 3.10) es no lineal. Para linealizarla se introduce la variable continua no negativa z , cuyo valor se determina a partir de las siguientes restricciones añadidas al modelo anterior:

$$z \geq \sum_{i \in V_0} \sum_{j \in V_F} \frac{c_{ij}}{S_k} \cdot x_{ij}^k, \forall k \in K \quad (3.11)$$

La función objetivo anterior (Ecuación 3.10) se sustituiría por:

Minimizar:

$$z \quad (3.12)$$

Nótese que esto es extensible a todos los modelos que siguen a continuación.

3.4. Modelo matemático para el problema de rutas de drones considerando el efecto de la batería

Como es lógico, que un dron pueda volar de manera continua en el tiempo es algo ficticio. Por ello, a la formulación del problema anterior se le añade el efecto del consumo de la batería. Se necesita por tanto introducir nuevos parámetros:

- la capacidad de la batería de cada uno de los drones B_k , $k \in K$ (puede estar expresada en tiempo, distancia, etc.),
- la cantidad de batería que se consume en el trayecto desde i hasta j , e_{ij} , $i \in V_0$, $j \in V_F$ (expresada en unidades consistentes con las de B_k).

La restricción que se muestra en la Ecuación 3.13 se incorpora al modelo anterior, ésta indica que la batería consumida por cada dron a lo largo de su ruta no debe superar su capacidad máxima.

$$\sum_{i \in V_0, j \in V_F} e_{ij} \cdot x_{ij}^k \leq B_k, \forall k \in K \quad (3.13)$$

3.5. Modelo matemático para el problema de rutas de drones considerando el efecto de la batería y estaciones de recarga

Por otro lado, es posible que ante grandes distancias o drones con baja capacidad de batería el problema anterior no tenga una solución factible, por lo que aparece la necesidad de formular un modelo en el que se incluyan estaciones de recarga. En particular, se asume que cada localización del conjunto de clientes puede disponer o no de una estación de recarga. Los nuevos parámetros son:

- RC_i indica si la localización $i \in cust$ dispone de estación de recarga si el valor es 1 o no, cuando el parámetro toma el valor 0.
- TR_k indica el tiempo de recarga de cada dron k , $k \in K$. Se asume un tiempo constante independientemente de lo que haya que cargarlo.

A las variables de decisión presentadas en la Sección 3.3 se le añaden las siguientes:

- bl_i^k : variable continua no negativa que representa la batería restante del dron $k \in K$ a su llegada al nodo $i \in V_F$.
- bs_i^k : variable continua no negativa que representa la batería restante del dron $k \in K$ a su salida del nodo $i \in V_0$.
- f_i^k : variable binaria que indica si el dron $k \in K$ recarga en el nodo $i \in V_0$. Toma el valor 1 cuando lo hace y 0 en otro caso.

Las restricciones correspondientes al estado de la batería y que son añadidas a las restricciones 3.2-3.9 son las siguientes:

- Todos los drones se cargan en el depósito si se utilizan (Ecuación 3.27). Se añade una restricción por cada dron $k \in K$.
- Si no se utiliza un dron, la carga de la batería es 0 a la salida del almacén (Ecuación 3.28).
- Si en la localización de un cliente $i \in cust$ no se dispone de estación de recarga, ningún dron se puede recargar en dicha localización (Ecuación 3.29). Se añade una restricción para cada cliente $i \in cust$ y cada dron $k \in K$.
- Si un cliente $i \in cust$ no es visitado por un dron $k \in K$ la carga de batería de dicho dron k al llegar o salir del cliente i se fija en 0 (Ecuaciones 3.30 y 3.31, respectivamente). Nótese que, las variables bs_i^k y bl_i^k no tienen interés cuando el dron k no visita al cliente i , por ello se les asigna un valor 0. Cuando el dron k visita al nodo i , entonces $y_i^k = 1$ y las restricciones 3.30 y 3.31 imponen que la carga de la batería no supera en ningún caso su capacidad máxima.
- Si un cliente $i \in cust$ no es visitado por un dron $k \in K$, éste no se puede recargar en esa estación (Ecuación 3.32).

La parte más complicada de modelar se refiere a la carga de la batería. La batería al salir de un nodo depende de si se carga o no en él:

$$bs_i^k = B_k \cdot f_i^k + bl_i^k \cdot (1 - f_i^k), \forall i \in cust, \forall k \in K \quad (3.14)$$

Nótese que, si la batería se carga en i , entonces $f_i^k = 1$ y la Ecuación 3.14 impone que la batería al salir de i es la carga total, $bs_i^k = B_k$. En caso contrario, $f_i^k = 0$ y la carga de batería al salir de i será la que había a su llegada, $bs_i^k = bl_i^k$. Nótese que aparece un problema de no linealidad, esto es, la restricción

3.14 es no lineal porque dos variables de decisión están multiplicándose entre sí, bl_i^k y f_i^k . Para evitar la no linealidad, se ha definido la variable auxiliar t_i^k :

$$t_i^k = bl_i^k \cdot (1 - f_i^k) \quad (3.15)$$

Para ello se introducen en el modelo matemático las Ecuaciones 3.34, 3.35 y 3.36. En lugar de las restricciones 3.14 se añaden las restricciones 3.33 para cada cliente $i \in cust$ y $k \in K$.

A continuación, hay que imponer que la batería restante al llegar a un nodo es la que había al salir desde el nodo desde el que se llega menos el consumo de batería en el trayecto:

$$bl_i^k = \sum_{j \in V_0} (bs_j^k - e_{ji}) \cdot x_{ji}^k, \forall i \in cust, \forall k \in K \quad (3.16)$$

donde se considera la suma en todos los posibles nodos $j \in V_0$ desde los que se puede acceder a i , y por las restricciones 3.4 solo uno de los términos del sumatorio tomará el valor 1, aquella x_{ji}^k que indique que se llega desde el nodo j con el dron k . En este caso, las restricciones 3.16 son también no lineales, ya que contienen el producto de las variables bs_j^k y x_{ji}^k . El procedimiento para linealizar las restricciones es el mismo que el ya explicado. Las variables auxiliares introducidas son:

$$s_{ji}^k = bs_j^k \cdot x_{ji}^k \quad (3.17)$$

De esta forma, se añade en el modelo matemático las restricciones 3.37 en lugar de las restricciones no lineales 3.16. Y la definición de las variables introducidas como 3.17 se consigue con las Ecuaciones 3.38 a 3.40 en el modelo matemático. Las restricciones de signo sobre las nuevas variables auxiliares se incluyen a través de la Ecuación 3.41.

La formulación completa del modelo se muestra a continuación. A la función objetivo se le añade el tiempo incurrido en la recarga de los drones (Ecuación 3.18).

Minimizar:

$$\sum_{i \in V_0} \sum_{j \in V_F} \sum_{k \in K} \frac{c_{ij}}{S_k} \cdot x_{ij}^k + \sum_{i \in V_0} \sum_{k \in K} f_i^k \cdot TR_k \quad (3.18)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i \in cust} d_i \cdot y_i^k \leq Q_k, \forall k \in K \quad (3.19)$$

$$\sum_{j \in V_F, k \in K} x_{ij}^k = y_i^k, \forall i \in cust \quad (3.20)$$

$$\sum_{j \in V_0, k \in K} x_{ji}^k = y_i^k, \forall i \in cust \quad (3.21)$$

$$\sum_{k \in K} y_i^k = 1, \forall i \in cust \quad (3.22)$$

$$x_{0C+1}^k = 0, \forall k \in K \quad (3.23)$$

$$u_i - u_j + (C + 1) \cdot x_{ij}^k \leq C, \forall i \in V_0, \forall j \in V_F, \forall k \in K \quad (3.24)$$

$$\sum_{i \in cust} y_i^k \leq C \cdot \sum_{i \in cust} x_{0i}^k, \forall k \in K \quad (3.25)$$

$$\sum_{i \in cust} x_{iC+1}^k \leq \sum_{i \in cust} x_{0i}^k, \forall k \in K \quad (3.26)$$

$$f_0^k \geq \sum_{j \in V_F} x_{0j}^k, \forall k \in K \quad (3.27)$$

$$bs_0^k \leq B_k \cdot \sum_{j \in V_F} x_{0j}^k, \forall k \in K \quad (3.28)$$

$$f_i^k \leq RC_i, \forall i \in cust, \forall k \in K \quad (3.29)$$

$$bs_i^k \leq B_k \cdot y_i^k, \forall i \in cust, \forall k \in K \quad (3.30)$$

$$bl_i^k \leq B_k \cdot y_i^k, \forall i \in cust, \forall k \in K \quad (3.31)$$

$$f_i^k \leq y_i^k, \forall i \in cust, \forall k \in K \quad (3.32)$$

$$bs_i^k = B_k \cdot f_i^k + t_i^k, \forall i \in cust, \forall k \in K \quad (3.33)$$

$$t_i^k \leq bl_i^k + f_i^k \cdot B_k \forall i \in cust, \forall k \in K \quad (3.34)$$

$$t_i^k \geq bl_i^k - f_i^k \cdot B_k \forall i \in cust, \forall k \in K \quad (3.35)$$

$$t_i^k \leq (1 - f_i^k) \cdot B_k \forall i \in cust, \forall k \in K \quad (3.36)$$

$$bl_i^k = \sum_{j \in V_0} s_{ji}^k - e_{ji} \cdot x_{ji}^k, \forall i \in cust, \forall k \in K \quad (3.37)$$

$$s_{ji}^k \leq bs_j^k + (1 - x_{ji}^k) \cdot B_k, \forall j \in V_0, \forall i \in V_F, \forall k \in K \quad (3.38)$$

$$s_{ji}^k \geq bs_j^k - (1 - x_{ji}^k) \cdot B_k, \forall j \in V_0, \forall i \in V_F, \forall k \in K \quad (3.39)$$

$$s_{ji}^k \leq B_k \cdot x_{ji}^k, \forall j \in V_0, \forall i \in V_F, \forall k \in K \quad (3.40)$$

$$s_{ji}^k \geq 0, \forall j \in V_0, \forall i \in V_F, \forall k \in K \quad (3.41)$$

Capítulo 4

Aplicación del modelo a un caso real: envío de mercancía a localidades aisladas de Teruel

4.1. Motivación

El estudio sobre Necesidades de Inversión en Conservación elaborado por la Asociación Española de la Carretera en 2016 acerca del estado de las carreteras del país [16], muestra que el estado de los firmes de Aragón es deficiente y se encuentra por debajo del valor medio del país. Más concretamente, es la tercera comunidad con peores carreteras de España, solo las de Asturias y La Rioja presentan peor estado. Además, Aragón presenta la menor puntuación en el estado de los elementos de balizamiento.

Por otro lado, Teruel se caracteriza por ser la provincia más fría de Aragón y una de las más frías de España. En la web de AEMET (Agencia Estatal de Meteorología), se recogen los valores climatológicos normales del periodo comprendido entre 1986 y 2010 en la estación de medida de Teruel [17]. De ahí se desprende que el número medio de nevadas al año es de algo más de 11 y que el número medio de heladas al año es de casi 95. Es preciso notar que la estación de medida de Teruel se encuentra a una altitud de 900 metros, luego en localidades más altas de la provincia el número de estos fenómenos puede ser mayor.

Ya de por sí, estos dos hechos por separado pueden suponer un problema para los habitantes de las localidades alejados de la capital en los meses fríos del año. La combinación de ambos hechos hace que exista una alta probabilidad de quedar incomunicados por carretera, teniendo así imposibilitado el acceso a determinados productos o servicios durante el tiempo que permanecen aislados.

En la actualidad, un helicóptero de emergencias es el encargado de transportar la mercancía hasta las zonas afectadas. Como se ha visto a lo largo del documento, con la expansión del sector de los drones, aplicaciones que hasta ahora se realizaban por el método convencional pasan ahora a estar asistidas mediante UAVs. A continuación, se propone la creación de una zona de cobertura que pueda ser atendida mediante este tipo de vehículos conforme a la legislación vigente.

4.2. Restricciones sobre el uso de UAVs en la legislación

No todas las localidades con tendencia a quedar aisladas pueden ser atendidas mediante drones, así como tampoco se pueden ubicar las bases de lanzamiento de los mismos donde se desee, ya que existen restricciones en el espacio aéreo que han de cumplirse. A continuación, se van a enumerar aquellas restricciones que pueden afectar en la provincia de Teruel. En primer lugar, debe respetarse la zona de control, que es una zona de seguridad alrededor de aeropuertos. La zona de control del aeródromo de Teruel se muestra en la Figura 4.1. Además, se puede observar en tono más claro una zona de seguridad adicional en la que para volar se necesita cooperación con el aeródromo.

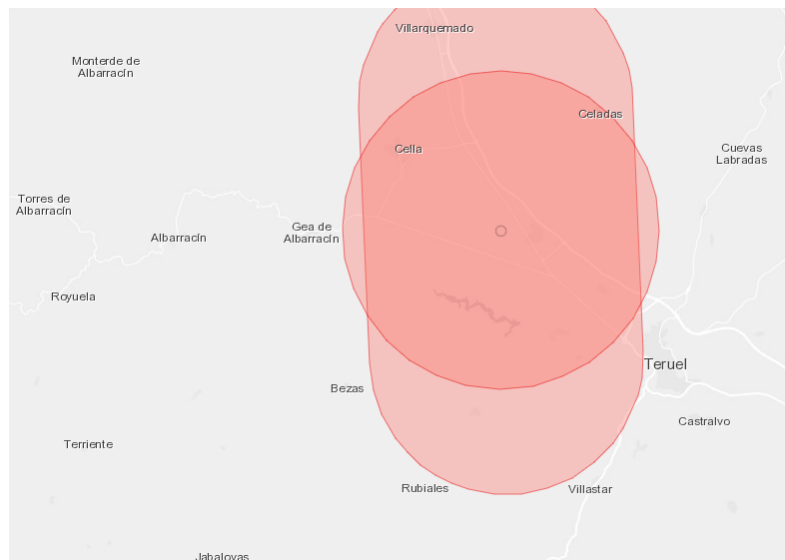


Figura 4.1: Zona de control del aeródromo de Teruel. Fuente: ENAIRE.

En segundo lugar, está prohibido sobrevolar la Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA). Las zonas más cercanas a Teruel con estas características se muestran en color rojo en la Figura 4.2.

Finalmente, los Lugares de Importancia Comunitaria (LIC), junto a las zonas ZEPA, conforman la Red Natura 2000, que es “(...) una red ecológica europea de áreas de conservación de la biodiversidad” [18]. El gestor de navegación aérea de España ENAIRE no especifica que haya un impedimento en sobrevolar los LIC, sino que se remite a cumplir el Real Decreto 1036/2017.

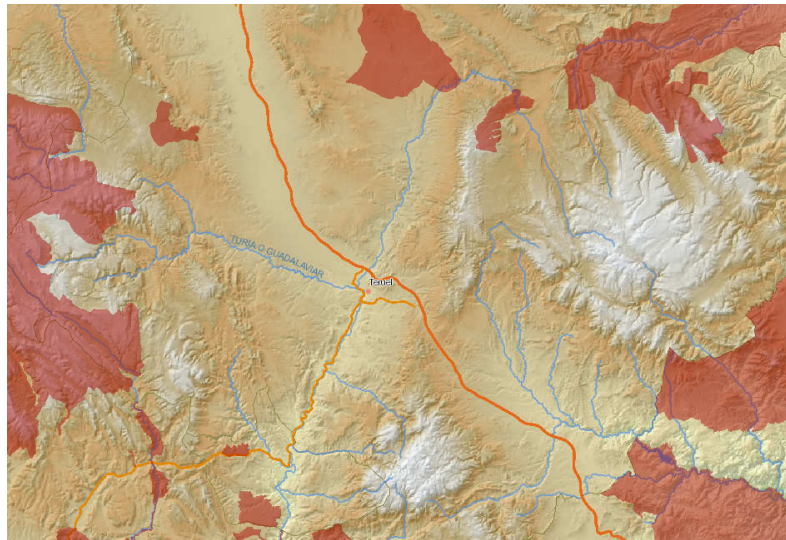


Figura 4.2: Zona de Especial Protección para las Aves. Fuente: GeoPortal del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.

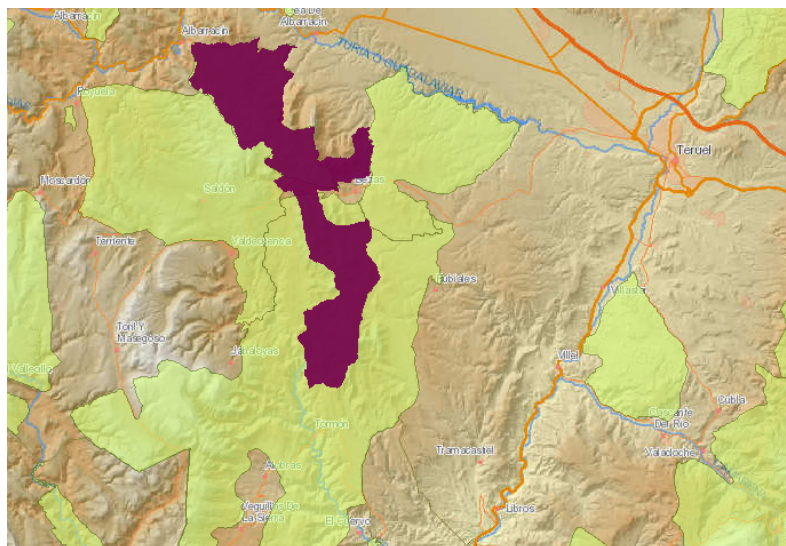


Figura 4.3: Lugares de Importancia Comunitaria (amarillo) y Paisaje Protegido de los Pinares de Rodeno (morado). Fuente: GeoPortal del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente.

Las comunidades autónomas son las responsables de poner límites de vuelo a través de planes de protección para cada uno de los Espacios Naturales Protegidos. Entre los de Teruel, destaca el Paisaje Protegido de los Pinares de Rodeno. Los LIC y el Paisaje Protegido de los Pinares de Rodeno se muestran en la Figura 4.3.

Es necesario entonces recurrir al plan correspondiente para asegurarse de que se puede sobrevolar la

zona, en este caso el Decreto 187/2014. Se citan a continuación aquellos artículos dónde queda recogida la información acerca de los vuelos [19]:

- (art. 13e) D 187/2014, de 28 de noviembre): “*El sobrevuelo con fines comerciales y recreativos realizado con aeronaves motorizadas a menos de 1.000 metros sobre la vertical del terreno se considera un uso incompatible. No obstante, se permite el sobrevuelo con ultraligeros por debajo de la cota señalada, siempre que no descieran por debajo de 500 metros sobre la vertical del terreno.*”
- (art. 13f) D 187/2014, de 28 de noviembre): “*El sobrevuelo con fines técnicos o científicos requerirá autorización del órgano ambiental competente.*”
- (II.4.2N17 D 187/2014, de 28 de noviembre): “*Quedará prohibido sobrevolar el Paisaje Protegido a menos de 1.000 metros de altura sobre la cota máxima del espacio protegido, con cualquier tipo de avión a motor o vela, parapente, ala delta y similares. Se excluyen de la prohibición los vuelos de salvamento, socorrismo, extinción de incendios u otros de carácter técnico, científico o divulgativo, de gestión, o los realizados por causas de fuerza mayor. En el caso de vuelos de carácter técnico, científico o divulgativo se deberá contar con la autorización del órgano ambiental competente.*”

La aplicación del uso de UAVs considerada en este trabajo no pretende tener fines comerciales o recreativos, sino que podría catalogarse como tareas de salvamento o ayuda de emergencia, es más, debería ser competencia de las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad para quedar excluida parcialmente del Real Decreto 1036/2017 como se vio en la Sección 2.1. Por ello, se concluye que no habría una restricción al vuelo, bien directamente o tras tramitar la autorización oportuna.

4.3. Parámetros de la zona de cobertura seleccionada

La zona de cobertura que se propone, como resultado del análisis del apartado anterior, es el suroeste de Teruel. La elección se debe a varias razones: peor acceso a la capital que el resto de zonas, lejanía a la autovía, una menor población, distancia entre localidades accesible para la tecnología dron actual y menores restricciones al vuelo (LIC, ZEPA). En la Figura 4.4 se muestra un mapa con la ubicación de las localidades. En la Tabla 4.1 se proporciona información relevante para cada una de las localidades. En la primera columna, el número de identificación del nodo que representa a la localidad en la red del sistema. En la segunda columna, aparece el nombre y en la tercera, el número de habitantes en el año 2017. Finalmente, se incluyen en las tres últimas columnas, las coordenadas y la altitud, valores necesarios para calcular la distancia entre cualesquiera dos ubicaciones.

Nótese que aunque la localización de la base de lanzamiento se modelice como un punto de coordenadas en el centro de la capital, ésta debería estar en un punto en las afueras que garantice que en ningún momento de la ruta el dron sobrevuele la zona de control del aeródromo.

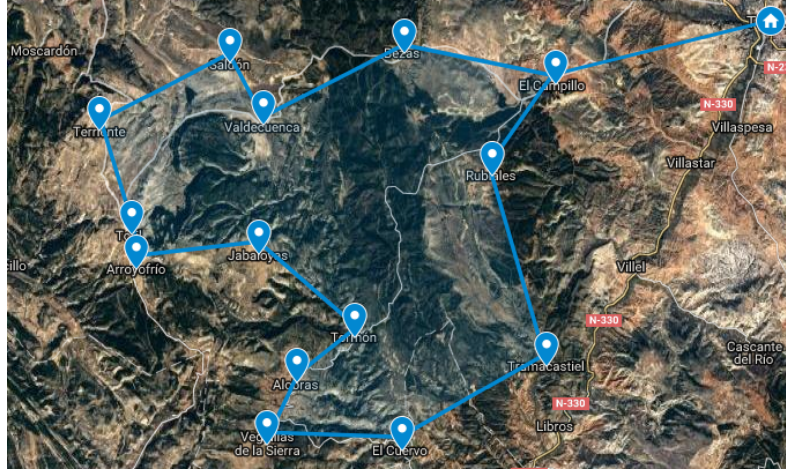


Figura 4.4: Ubicación de las localidades. Fuente: Google Maps.

ID.	Localidad	Nº Hab. (2017)	X_UTM30	Y_UTM30	Altitud [m]
00	Teruel (Depósito de UAVs)	-	660800	4467700	915
01	El Campillo	63	650114	4464480	915
02	Bezas	62	642450	4466050	1165
03	Valdecuenca	37	635320	4462300	1331
04	Saldón	26	633610	4465170	1395
05	Terriente	178	627180	4462030	1443
06	Toril	29	628810	4456650	1490
07	Arroyofrío	8	629029	4454835	1405
08	Jabaloyas	68	635450	4455850	1405
09	Tormón	34	640200	4451770	1051
10	Alobras	65	637360	4449350	1110
11	Veguillas de la Sierra	19	635870	4446340	1270
12	El Cuervo	93	642700	4446100	905
13	Tramacastiel	67	649950	4450350	879
14	Rubiales	52	647120	4460090	1167

Tabla 4.1: Datos de las localidades. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Instituto Aragonés de Estadística y del Instituto Nacional de Estadística.

Como se ha indicado, con los datos de la tabla es posible calcular la matriz de distancias (en km) que se empleará para las resoluciones posteriores. En particular, la distancia entre dos localidades se calcula como la diferencia de altura sumada a la distancia euclídea (Ecuación 4.1), resultando la matriz de la Tabla 4.2. La primera fila corresponde a las distancias desde el almacén hasta cada una de las 14 poblaciones. La última columna corresponde al almacén como punto final. En el cálculo de las distancias no se han tenido en cuenta las distancias correspondientes al despegue y al aterrizaje, siendo éstas variables según la topografía del terreno.

$$c_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} + |z_i - z_j| \quad (4.1)$$

$$c_{ij} = \begin{pmatrix} 11,16 & 18,43 & 26,05 & 27,31 & 34,10 & 33,85 & 34,28 & 27,99 & 26,04 & 29,77 & 32,83 & 28,18 & 20,46 & 15,66 & 0 \\ 0 & 7,83 & 14,96 & 16,53 & 23,07 & 22,70 & 23,19 & 17,02 & 16,12 & 19,79 & 23,07 & 19,82 & 14,13 & 5,32 & 11,16 \\ 7,83 & 0 & 8,06 & 8,89 & 15,79 & 16,57 & 17,49 & 12,37 & 14,46 & 17,46 & 20,78 & 19,95 & 17,40 & 7,57 & 18,43 \\ 14,96 & 8,06 & 0 & 3,34 & 8,15 & 8,62 & 9,76 & 6,45 & 11,61 & 13,11 & 15,97 & 17,81 & 18,90 & 12,01 & 26,05 \\ 16,53 & 8,89 & 3,34 & 0 & 7,16 & 9,78 & 11,30 & 9,50 & 14,94 & 16,26 & 18,97 & 21,13 & 22,07 & 14,44 & 27,31 \\ 23,07 & 15,79 & 8,15 & 7,16 & 0 & 5,62 & 7,43 & 10,32 & 16,58 & 16,26 & 17,94 & 22,25 & 25,60 & 20,04 & 34,10 \\ 22,70 & 16,57 & 8,62 & 9,78 & 5,62 & 0 & 1,83 & 6,69 & 12,40 & 11,25 & 12,50 & 17,45 & 22,07 & 18,63 & 33,85 \\ 23,19 & 17,49 & 9,76 & 11,30 & 7,43 & 1,83 & 0 & 6,50 & 11,59 & 9,98 & 10,91 & 16,23 & 21,40 & 18,84 & 34,28 \\ 17,02 & 12,37 & 6,45 & 9,50 & 10,32 & 6,69 & 6,50 & 0 & 6,27 & 6,78 & 9,52 & 12,16 & 15,52 & 12,42 & 27,99 \\ 16,12 & 14,46 & 11,61 & 14,94 & 16,58 & 12,40 & 11,59 & 6,27 & 0 & 3,73 & 6,95 & 6,20 & 9,85 & 10,82 & 26,04 \\ 19,79 & 17,46 & 13,11 & 16,26 & 16,26 & 11,25 & 9,98 & 6,78 & 3,73 & 0 & 3,36 & 6,25 & 12,63 & 14,51 & 29,77 \\ 23,07 & 20,78 & 15,97 & 18,97 & 17,94 & 12,50 & 10,91 & 9,52 & 6,95 & 3,36 & 0 & 6,84 & 14,65 & 17,77 & 32,83 \\ 19,82 & 19,95 & 17,81 & 21,13 & 22,25 & 17,45 & 16,23 & 12,16 & 6,20 & 6,25 & 6,84 & 0 & 8,40 & 14,67 & 28,18 \\ 14,13 & 17,40 & 18,90 & 22,07 & 25,60 & 22,07 & 21,40 & 15,52 & 9,85 & 12,63 & 14,65 & 8,40 & 0 & 10,15 & 20,46 \\ 5,32 & 7,57 & 12,01 & 14,44 & 20,04 & 18,63 & 18,84 & 12,42 & 10,82 & 14,51 & 17,77 & 14,67 & 10,15 & 0 & 15,66 \end{pmatrix}$$

Tabla 4.2: Matriz de distancias en kilómetros. Fuente: Elaboración propia.

En la generación de los diferentes escenarios es necesario disponer de datos sobre la demanda de los clientes, que en este caso son las necesidades de abastecimiento que tiene cada una de las localidades. En este trabajo, para mostrar el funcionamiento de la herramienta, se ha construido un generador de demanda en Microsoft Excel 2016 que permite simular cómo serían las necesidades de abastecimiento en cada escenario.

El generador considera en cada localidad el número de habitantes y determina qué habitantes solicitan mercancía y cuál es el peso de la mercancía solicitada. Para ello se realiza un sorteo según un modelo $Bernoulli(p)$ para cada habitante, de forma que un habitante solicita mercancía con probabilidad p . En el caso de que en el sorteo la variable tome valor 1, se ha de generar el valor del peso de la mercancía. En este caso, se considera una variable discreta W que puede tomar r valores distintos de peso expresado en kilogramos $\{w_1, \dots, w_r\}$, de forma que $\sum_r P(W = w_r) = 1$. Ello significa que pueden solicitarse r tipos de mercancía.

Nótese que, el número de habitantes que solicitan mercancía de una localidad con N habitantes tiene un comportamiento binomial de parámetros N y p y su valor medio es Np . El peso medio de la mercancía solicitada por un habitante cualquiera se calcula (Ecuación 4.2):

$$E(W) = \sum_r w_r P(W = w_r) \quad (4.2)$$

Por tanto, aplicando propiedades del cálculo de probabilidades sobre la esperanza de una suma aleatoria de variables aleatorias, la demanda media de una localidad $i \in cust$ será (Ecuación 4.3):

$$E(D_i) = NpE(W) \quad (4.3)$$

4.4. Diseño de rutas óptimas de los UAVs

Los tres modelos formulados en el Capítulo 3 se implementan en el software de optimización CPLEX Studio Versión 12.6.0. El código correspondiente a cada uno de ellos se incluye en el Anexo II, asimismo, también se incluye en dicho anexo un ejemplo de fichero de parámetros de entrada, concretamente el utilizado para resolver la última parte del escenario 4.4.3.

En esta sección, se van a definir tres escenarios diferentes según sea el periodo de aislamiento y el tipo y la cantidad de carga demandada por cada localidad. Para cada escenario, atendiendo a sus características se han revisado los modelos de dron disponibles. En particular, se ha seleccionado aquellos con tecnología multirrotor o helicópteros no tripulados, debido a una mayor facilidad tanto para maniobrar en el despegue y el aterrizaje que los de ala fija, como para el proceso de recogida de la mercancía. En el Anexo III se ha incluido los aspectos técnicos de aquellos modelos cuyos respectivos fabricantes proporcionaban. La revisión de estas características ha permitido elegir en cada uno de los escenarios el modelo de dron considerado más adecuado entre los modelos multirrotor.

4.4.1. Periodos cortos de aislamiento con demanda puntual de medicamentos

El primero de los escenarios pretende reflejar una situación de aislamiento de poca duración en el que la única mercancía enviada sean algunos medicamentos. Se cree poco probable que todos los habitantes ante un aislamiento por un periodo corto de tiempo puedan solicitar masivamente el envío de fármacos, por lo que se fija una probabilidad de demanda del 5 %. Como se muestra en la Tabla 4.3, se pueden solicitar productos con un peso de 100 g (varias cajas de pastillas) o 500 g (inyecciones o envases de líquidos) indistintamente, esto es, con la misma probabilidad 0,5.

Tipo de producto	w_r [kg]	$P(W = w_r)$ [%]
Medicamento ligero	0,1	50
Medicamento medio	0,5	50

Tabla 4.3: Características de la demanda (Escenario 4.4.1). Fuente: Elaboración propia.

La esperanza de la demanda para cada localidad se muestra en la Tabla 4.4.

ID. Localidad	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	Total
$E(D_i)$ [kg]	0,9	0,9	0,6	0,4	2,7	0,4	0,1	1,0	0,5	1,0	0,3	1,4	1,0	0,8	12,0

Tabla 4.4: Esperanza de la demanda de cada una de las localidades (Escenario 4.4.1). Fuente: Elaboración propia.

Dada la tipología de la demanda, se decide evitar los tiempos en la recarga de los UAVs, a fin de establecer un sistema de envío de medicamentos lo más rápido posible. A día de hoy, muchos modelos de drones son capaces de transportar cargas de 12 kg, sin embargo, no hay tantos que tengan la autonomía suficiente como para que no requieran recargar durante la ruta.

Este escenario se va a resolver con dos modelos de drones diferentes, el Scout B-330 UAV Helicopter del fabricante aeroscout (Figura 4.5) y el Gyro-X8 de SLIDX. Conviene destacar que, aunque no son drones diseñados específicamente para el traslado de mercancía, los fabricantes dan flexibilidad a la hora de ajustarse al diseño de los mismos según sea el tipo de operación. En la Tabla 4.5 se comparan las especificaciones de ambos drones.



Figura 4.5: Scout B-330 UAV Helicopter (aeroscout). Fuente: Spatial Source.

Dron	Tipo de UAV	Propulsión	Carga	Autonomía	Velocidad
Scout B-330 UAV Helicopter	Helicóptero	Gasolina	50 kg	180 min	60 km/h
Gyro-X8	Multirroto	Eléctrica	15 kg	40 min	110 km/h

Tabla 4.5: Especificaciones de los drones utilizados. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de aeroscout y SLIDX.

Las rutas óptimas al resolver el segundo modelo matemático propuesto en el Capítulo 3 con ambos drones se muestran en las Figuras 4.6 y 4.7, respectivamente. Como se puede comprobar, solo es necesario un dron B-330, mientras que se necesitan hasta 3 drones Gyro-X8.

El tiempo de cómputo para encontrar la solución óptima en el primer caso es de apenas unos segundos y devuelve un objetivo de 1,7876 horas, esto es, 107,25 minutos que por haber solo una ruta, se corresponde con el tiempo de finalización de la operación.

Con el modelo Gyro-X8, el tiempo de resolución del modelo matemático aumenta hasta los 34 minutos. El valor de la función objetivo, 1,9156 horas, es superior a la obtenida con el dron B-330. Este valor se obtiene como suma de los tiempos que tardan los tres drones en recorrer su ruta. Para calcular el tiempo de operación se determina el mayor de los tres valores. Una descripción de la solución óptima se incluye en la Tabla 4.6. Para cada uno de los tres drones se ha incluido la distancia recorrida, el tiempo necesario para recorrerla y la carga transportada. Se observa que los tres drones viajan bastante equilibrados, tanto

en carga, como en distancia recorrida, siendo el tiempo final de la operación el marcado por la ruta 2 (ruta en verde de la Figura 4.7) con un tiempo de 39 minutos en comparación con los 107,25 minutos de la solución anterior. En la función objetivo no se ha considerado los costes de activación de los drones.

Antes de tomar una decisión habría que establecer si compensa disponer de tres drones y disminuir el tiempo de operación, o seleccionar un dron más potente, aunque eso suponga aumentar el tiempo de operación.

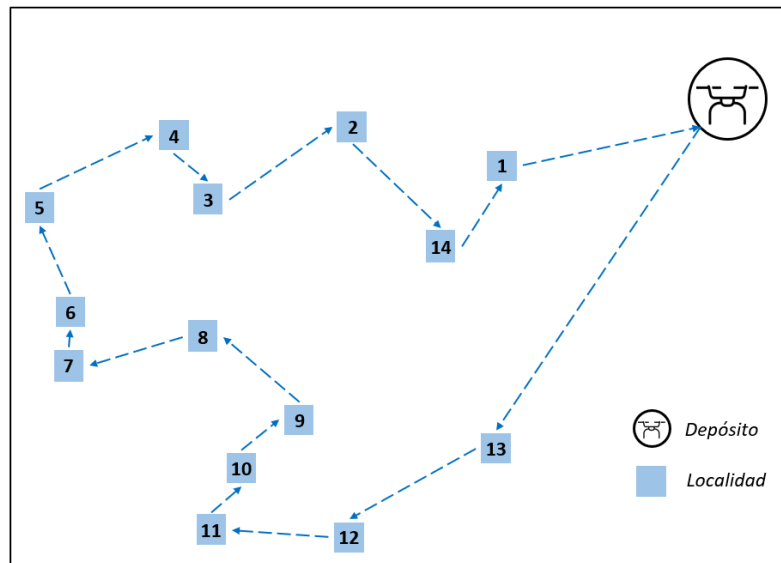


Figura 4.6: Ruta solución (Scout B-330 UAV Helicopter). Fuente: Elaboración propia.

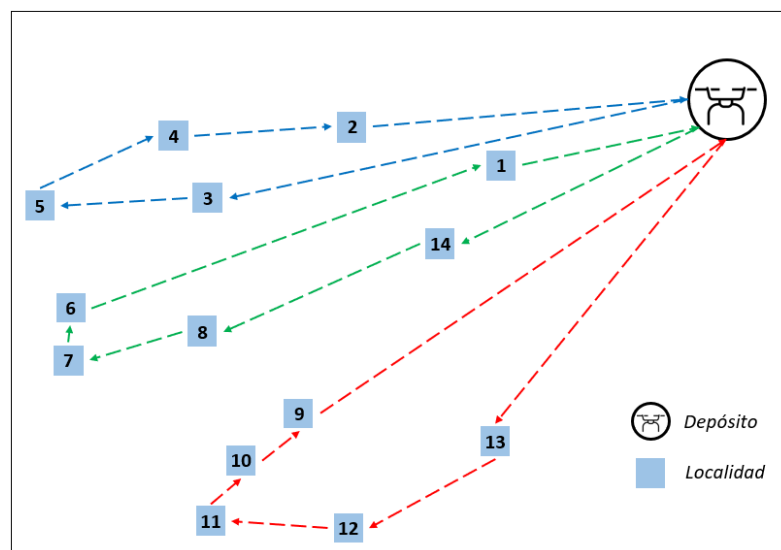


Figura 4.7: Ruta solución (Gyro-X8). Fuente: Elaboración propia.

Rutas	Distancia	Tiempo	Carga
Ruta 1 (Azul)	69,71 km	38 min	4,5 kg
Ruta 2 (Verde)	71,41 km	39 min	3,3 kg
Ruta 3 (Rojo)	69,61 km	38 min	4,2 kg

Tabla 4.6: Características de la solución (Gyro-X8). Fuente: Elaboración propia.

En la resolución del modelo matemático para los dos modelos de dron se ha considerado como función objetivo minimizar la suma del tiempo de recorrido de todas las rutas. A continuación, tal y como se comentó al final de la Sección 3.3, se va a considerar una función objetivo alternativa para minimizar el tiempo de la ruta más larga, que es la que determina el tiempo de finalización de la operación.

Para poder comparar las dos soluciones óptimas de diseño de rutas, se resuelve el problema con el modelo de dron Gyro-X8 para el que son necesarios tres drones. Con el otro modelo no tendría sentido al realizar una única ruta. Frente a los 34 minutos de tiempo de cálculo para alcanzar el óptimo por el software de optimización, con la nueva función objetivo, se reduce a apenas 8 minutos, obteniéndose un objetivo de 0,6482 horas (39 minutos). La ruta solución para cada dron así como las características de las mismas se muestran en la Figura 4.8 y en la Tabla 4.7 respectivamente.

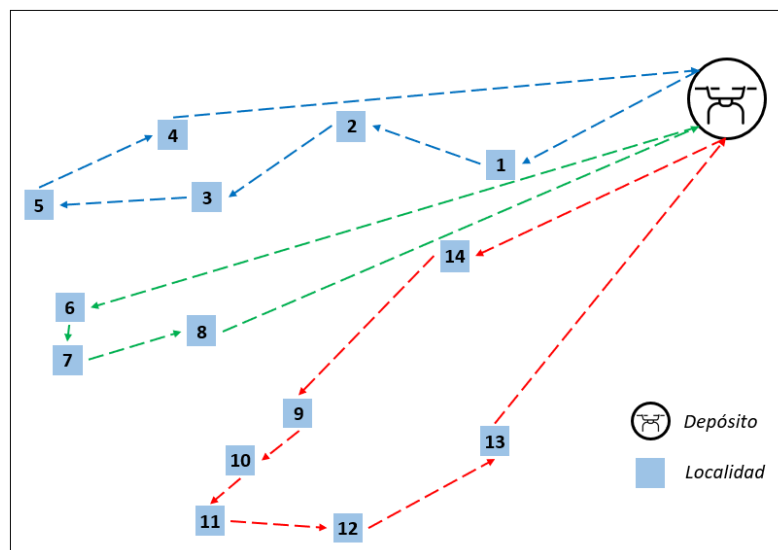


Figura 4.8: Ruta solución (Gyro-X8). Fuente: Elaboración propia.

Rutas	Distancia	Tiempo	Carga
Ruta 1 (Azul)	70,70 km	39 min	5,5 kg
Ruta 2 (Verde)	71,31 km	39 min	1,6 kg
Ruta 3 (Rojo)	70,28 km	39 min	5,0 kg

Tabla 4.7: Características de la solución (Gyro-X8). Fuente: Elaboración propia.

Se distinguen pequeños cambios en las rutas: ahora el dron azul visita además el nodo 1, el dron verde deja de visitar los nodos 1 y 14, y el nodo 14 es visitado ahora por el dron rojo. La diferencia tanto en distancia como en tiempo es muy pequeña. Sin embargo ahora los drones no van tan equilibrados en carga como antes, así como en el número de localidades que visitan.

Dadas las características de los escenarios, en los que prima la rapidez con la que acaba la operación, es decir, cuánto tiempo se precisa para atender todos las localidades, se considera una mejor opción el uso de la nueva función objetivo, por lo que de aquí en adelante será la que se utilice.

4.4.2. Periodos de duración media de aislamiento con demanda mixta de medicamentos y productos de primera necesidad

Conforme aumenta el tiempo de aislamiento, la probabilidad de que cada habitante tenga la necesidad de solicitar mercancía es mayor. Asimismo, en periodos de mayor duración en el periodo de aislamiento, no solo es necesario el envío de medicamentos, sino que pueden requerirse productos de primera necesidad.

Los datos sobre la demanda en este segundo escenario se han simulado con la herramienta de Excel y en este caso, se aumenta la probabilidad de demanda hasta un 15 %. Además se ha modificado la distribución de probabilidad del peso de la mercancía solicitada por cada habitante que decide hacer una petición. De este modo, en caso de demanda, la distribución del peso de la mercancía se muestra en la Tabla 4.8.

Tipo de producto	w_r [kg]	$P(W = w_r)$ [%]
Medicamento ligero	0,1	25
Medicamento medio	0,5	25
Mercancía ligera	1	25
Mercancía media	2	25

Tabla 4.8: Características de la demanda (Escenario 4.4.2). Fuente: Elaboración propia.

Una idea sobre los valores que pueden aparecer de demanda en cada una de las localidades y que depende de su número de habitantes se proporciona en la Tabla 4.9, en la que se incluye la demanda media para cada localidad.

ID. Localidad	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	Total
$E(D_i)$ [kg]	8,5	8,4	5,0	3,5	24,0	3,9	1,1	9,2	4,6	8,8	2,6	12,6	9,0	7,0	108,1

Tabla 4.9: Esperanza de la demanda de cada una de las localidades (Escenario 4.4.2). Fuente: Elaboración propia.

Dadas las restricciones sobre la carga del modelo de dron eléctrico utilizado en el escenario anterior, 15 kg, en este nuevo escenario no puede proporcionar soluciones factibles, ya que la demanda de alguna

localidad, de las que tienen un mayor número de habitantes, es superior por sí sola a la capacidad de carga del dron. En la Tabla 4.9 se observa como el nodo 5 tiene una demanda media de 24 kg. Por el mismo motivo, si se considera en este escenario el helicóptero no tripulado del escenario anterior, al aumentar la demanda son necesarios al menos 3 para encontrar soluciones factibles al problema de diseño de rutas.

En este escenario, se va a resolver el tercer modelo matemático del Capítulo 3 con tres modelos de drones, el helicóptero no tripulado del escenario anterior, y dos drones del fabricante noruego GRIFF Aviation. Las especificaciones de estos dos modelos se muestran en la Tabla 4.10. Además se ha incluido de nuevo las especificaciones del helicóptero para facilitar la comparación.

Dron	Tipo de UAV	Propulsión	Carga	Autonomía	Velocidad	Tiempo de recarga
Scout B-330 UAV Helicopter	Helicóptero	Gasolina	50 kg	180 min	60 km/h	n/a
GRIFF 135	Multirrotor	Eléctrica	30 kg	45 min	50 km/h	1 h
GRIFF 350	Multirrotor	Eléctrica	150 kg	20 min	50 km/h	1 h

Tabla 4.10: Especificaciones de los drones utilizados. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de GRIFF Aviation y aeroscout.

Son necesarios al menos 4 drones GRIFF 135 o uno GRIFF 350 para obtener soluciones factibles al problema formulado. En la resolución con ambos modelos de GRIFF Aviation se va a permitir que el software encuentre aquellas localidades, entre todas ellas, en las que se ha de efectuar la recarga. Además, se supone que los drones se encuentran descargados en el almacén, con ello se consigue fijar un coste de activación y reducir el número de drones necesarios.

En primer lugar, la solución del problema con el helicóptero no tripulado se muestra en la Figura 4.9. La distancia, el tiempo y la carga de cada uno de los vehículos se incluyen en la Tabla 4.11.

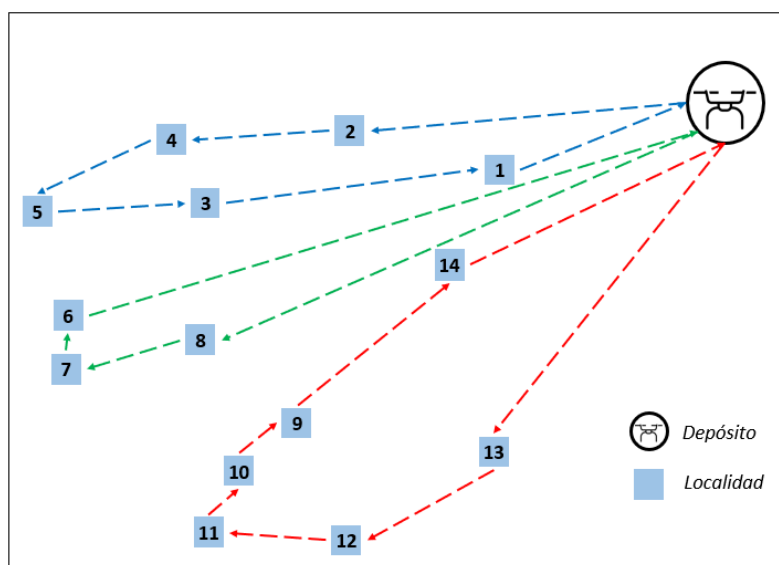


Figura 4.9: Ruta solución (Scout B-330 UAV Helicopter). Fuente: Elaboración propia.

Rutas	Distancia	Tiempo	Carga
Ruta 1 (Azul)	69,78 km	70 min	49,4 kg
Ruta 2 (Verde)	71,65 km	72 min	14,2 kg
Ruta 3 (Rojo)	70,28 km	71 min	44,6 kg

Tabla 4.11: Características de la solución (Scout B-330 UAV Helicopter). Fuente: Elaboración propia.

El objetivo considerado consiste en minimizar la máxima duración de una ruta. Se observa en la solución óptima que la duración de la ruta de los tres helicópteros no tripulados es aproximadamente la misma, siendo el máximo 72 minutos. Sin embargo, la carga está desequilibrada, es similar en los drones azul y rojo, pero en el dron verde la carga es aproximadamente un 30 % de la carga de los otros dos. Esto puede deberse a que el dron verde visita los nodos más alejados, pero en media no solicitan mucha mercancía. Sin embargo, los nodos con mayor demanda media (Tabla 4.9) son los nodos 5 y 12, visitados por los drones azul y rojo, respectivamente.

En el caso del GRIFF 135, debido a la combinatoria del problema, bastante grande al necesitar de 4 drones y poder recargar donde se desee, se decide pausar la resolución tras más de 30 minutos (el proceso de resolución podría demorarse horas). Por este motivo, no se puede asegurar que la ruta que se muestra en la Figura 4.10 sea la óptima, sin embargo, ésta tiene un gap del 1,71 % respecto a la óptima, con lo que el error cometido no es muy grosero.

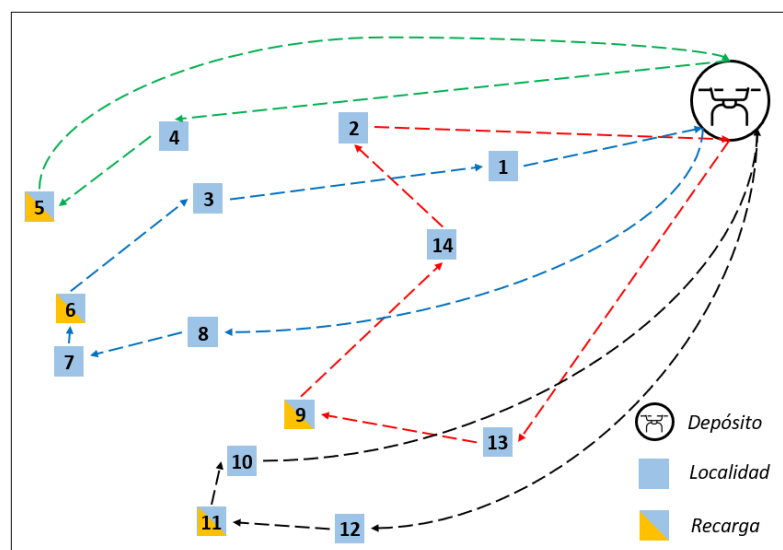


Figura 4.10: Ruta solución (GRIFF 135). Fuente: Elaboración propia.

Rutas	Distancia	Tiempo	Carga
Ruta 1 (Azul)	72,20 km	207 min	27,7 kg
Ruta 2 (Verde)	69,61 km	204 min	27,5 kg
Ruta 3 (Rojo)	67,71 km	201 min	29,0 kg
Ruta 4 (Negro)	68,87 km	203 min	23,9 kg

Tabla 4.12: Características de la solución (GRIFF 135). Fuente: Elaboración propia.

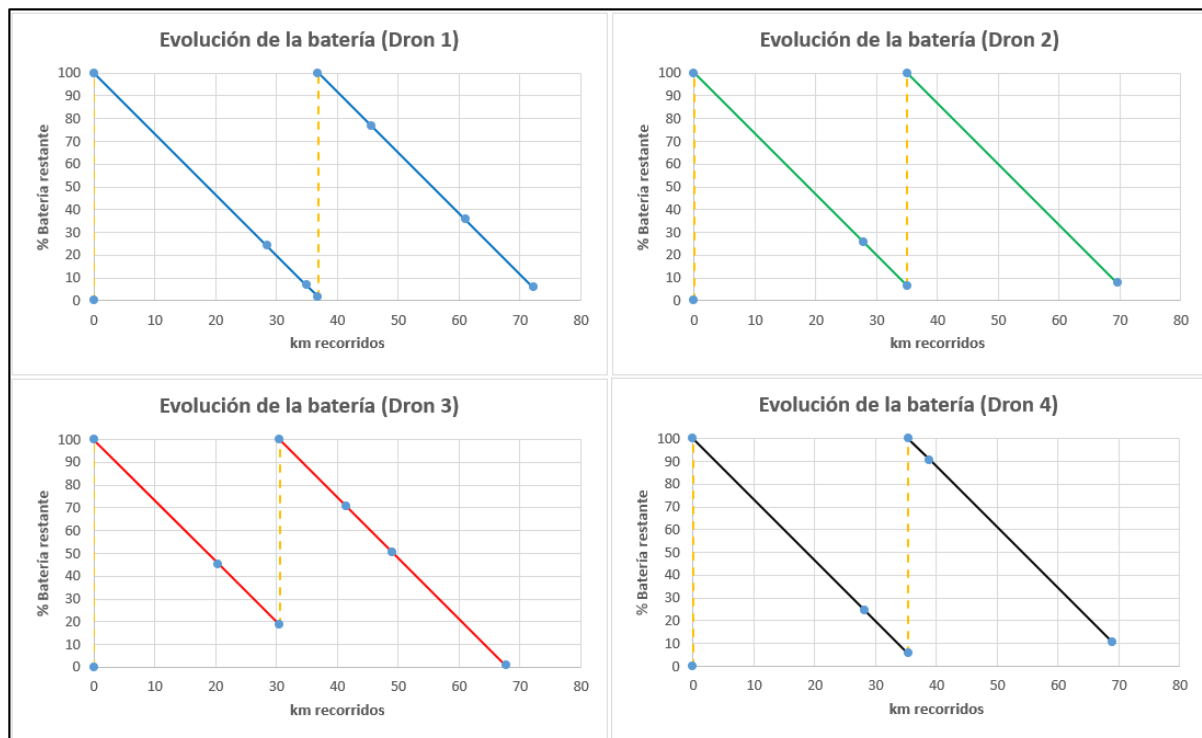


Figura 4.11: Evolución de la batería restante de la flota de drones. Fuente: Elaboración propia.

La autonomía del modelo GRIFF 135 son 45 minutos, por ello los cuatro drones tienen que recargar una vez. En la Figura 4.10 se muestra qué localidad es la óptima para la recarga de cada dron. Se observa que las rutas propuestas son muy diferentes a las obtenidas en las otras soluciones, y que en este caso tanto la distancia, como el tiempo y la carga en cada uno de los drones está equilibrado. El tiempo de operación son 207 minutos.

Además, en la Figura 4.11 se representa el porcentaje de batería restante de cada uno de los drones a medida que viajan por la ruta. Como era de esperar, los gráficos evidencian una relación lineal entre los kilómetros recorridos y el porcentaje de batería restante, esto es debido a las unidades en las que se han introducido en el software los parámetros B_k y e_{ij} , ambos en kilómetros. Excepto en el dron 3, en el que se recarga la batería cuando todavía quedaba un 20 %, en el resto de los drones la batería se utiliza prácticamente en su totalidad hasta su recarga.

Por último, el modelo GRIFF 350 tiene una autonomía de tan solo 20 minutos, frente a los 45 minutos del modelo GRIFF 135, pero la carga puede llegar hasta los 150 kg. En este escenario, la carga media de todas las localidades suma 108,1 kg, luego si se permite la recarga es posible que un solo dron las atienda a todas. La ruta solución para el GRIFF 350 se muestra en la Figura 4.12. El tiempo en encontrar la solución óptima es de apenas 4 segundos, con un objetivo de 10,1606 horas, esto es, 609,63 minutos. Como se puede observar, este modelo necesita recargar hasta 7 veces durante la ruta. Se declara totalmente inviable la utilización de este tipo de aeronave, ya que, además de la demora en la entrega a los habitantes, el dron tendría que realizar la ruta en horas sin luz.

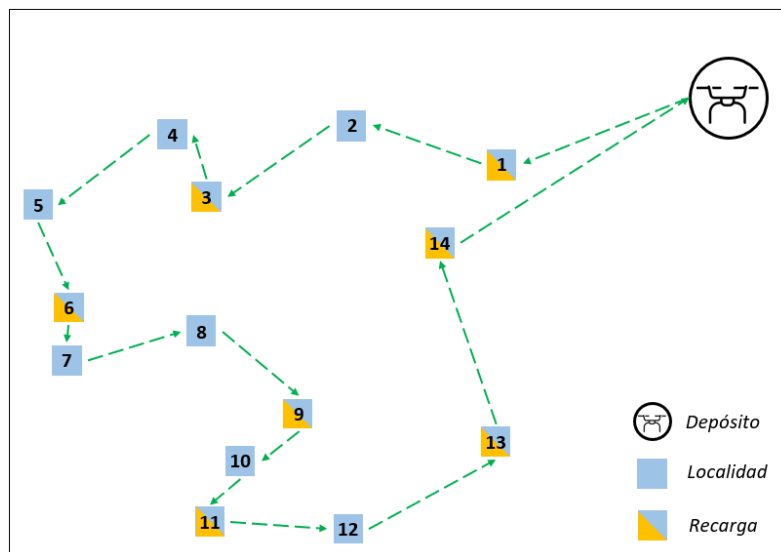


Figura 4.12: Ruta solución (GRIFF 350). Fuente: Elaboración propia.

Conviene destacar que el hecho de introducir los parámetros correspondientes a la batería cómo una autonomía de kilómetros o de minutos de vuelo, viene marcado por la información que facilitan los fabricantes. Se marca como objetivo futuro representar la batería como una función de la carga transportada, así como considerar la recarga parcial de las aeronaves.

4.4.3. Periodos largos de aislamiento con alta demanda

En este último escenario, para reflejar la demanda en periodos largos de aislamiento (mayor que una semana) se aumenta la probabilidad de demanda de cada habitante hasta un 25 %, una cifra que se cree bastante elevada. Al igual que en los casos anteriores, en la Tabla 4.13 se muestran los tipos de mercancía y la probabilidad con la que se solicita cada tipo cuando un habitante decide demandar un producto. A los tipos de mercancía del escenario anterior se ha añadido un nuevo tipo de producto, el de mercancía pesada (5 kg). Nótese que el reparto está más centrado ahora en la distribución de productos de primera necesidad que en medicamentos, que suman solo un 20 % de las peticiones. La demanda media de cada localidad se recoge en la Tabla 4.14. En este escenario, la media de la suma de demandas de todas las localidades se eleva a 392,5 kg frente a los 108,1 kg del escenario anterior.

Tipo de producto	w_r [kg]	$P(W = w_r)$ [%]
Medicamento ligero	0,1	10
Medicamento medio	0,5	10
Mercancía ligera	1	30
Mercancía media	2	30
Mercancía pesada	5	20

Tabla 4.13: Características de la demanda (Escenario 4.4.3). Fuente: Elaboración propia.

ID. Localidad	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	Total
$E(D_i)$ [kg]	30,9	30,4	18,1	12,7	87,2	14,2	3,9	33,3	16,7	31,9	9,3	45,6	32,8	25,5	392,5

Tabla 4.14: Esperanza de la demanda de cada una de las localidades (Escenario 4.4.3). Fuente: Elaboración propia.

El helicóptero no tripulado empleado en los dos escenarios anteriores, con una carga máxima de 50 kg es evidente que se queda corto de prestaciones de carga, ya que hay una localidad cuya demanda media supera los 80 kg. Por otro lado, se ha comprobado que los drones multirrotor eléctricos tampoco son una buena opción, puesto que se demora mucho tiempo en el proceso de recarga.

Para el diseño de las rutas en este escenario, se selecciona un nuevo modelo, el dron DP-14 Hawk (Figura 4.13), perteneciente al fabricante DPI UAV, una aeronave especialmente diseñada para el transporte de gran cantidad de carga y que por su autonomía no precisa recargar. Sus especificaciones se pueden ver en la Tabla 4.15.

Dron	Tipo de UAV	Propulsión	Carga	Autonomía	Velocidad
DP-14 Hawk (DPI UAV)	Helicóptero	Jet Fuel	195 kg	144 min	72 km/h

Tabla 4.15: Especificaciones del DP-14 Hawk. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de DPI UAV.

Con este modelo, son necesarios tres drones para proporcionar soluciones factibles. El tiempo de resolución del segundo modelo del Capítulo 3 está cercano a los 5 minutos, tras ello, el software devuelve la solución óptima de objetivo 0,9903 horas, esto es, 59,418 minutos. Las rutas de la solución óptima se representan en la Figura 4.14 y coinciden con algunas de las obtenidas anteriormente.



Figura 4.13: DP-14 Hawk. Fuente: DPI UAV SYSTEMS.

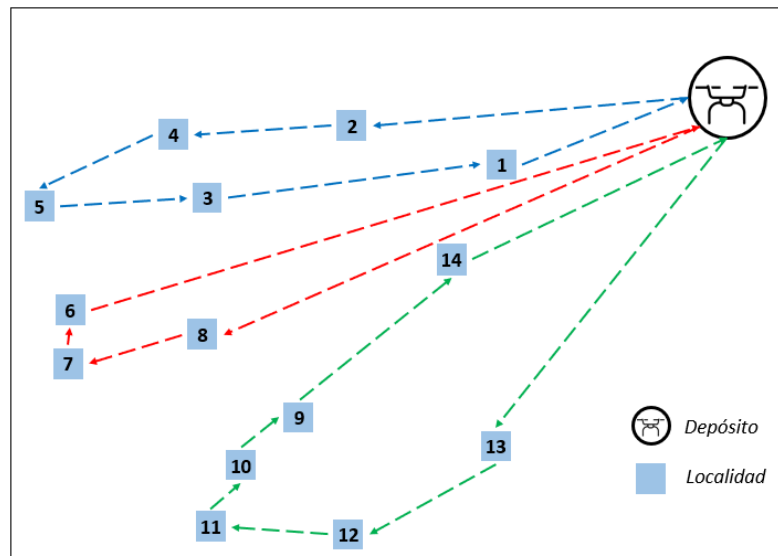


Figura 4.14: Ruta solución (DP-14 Hawk). Fuente: Elaboración propia.

Rutas	Distancia	Tiempo	Carga
Ruta 1 (Azul)	70,28 km	59 min	179,3 kg
Ruta 2 (Verde)	69,78 km	58 min	161,7 kg
Ruta 3 (Rojo)	71,31 km	60 min	51,5 kg

Tabla 4.16: Características de la solución (Gyro-X8). Fuente: Elaboración propia.

Como se ha comentado, ninguno de los drones precisa reponer combustible, es más, la autonomía restante de los UAVs al llegar al depósito es de 85, 86, y 84 minutos respectivamente, lo que permitiría

ampliar la zona de cobertura si fuera necesario.

En la solución óptima, el tiempo de operación es 60 minutos. Dado el objetivo de minimizar la duración máxima de la ruta, se obtienen rutas equilibradas en tiempo y distancia. Sin embargo, de nuevo los drones no van equilibrados. El tercer dron viaja 143,5 kg por debajo de su capacidad máxima, esto es, a un 26 % de su capacidad. Esto hace plantearse dos cuestiones, la primera, conocer cuánto puede incrementarse la demanda, de forma que la solución óptima continuara precisando de una flota de 3 UAVs. La segunda cuestión, si puede mejorarse el diseño de las rutas si se utiliza una flota heterogénea, esto es, disponer de drones de distinto modelo en el mismo diseño.

Sobre la primera de las cuestiones, se comprueba que el modelo encuentra soluciones factibles aumentando la probabilidad de que un habitante de la localidad solicite mercancía hasta un 37 % frente al 25 % actual, una cifra bastante considerable, ya que supondría estar distribuyendo más de media tonelada de carga.

Acerca de la segunda cuestión, y tomando como referencia la esperanza de demanda que mostraba la Tabla 4.14, se resuelve de nuevo el problema, esta vez permitiendo obtener como resultado una flota heterogénea entre los modelos de la Tabla 4.17.

Dron	Tipo de UAV	Propulsión	Carga	Autonomía	Velocidad
DP-14 Hawk (DPI UAV)	Helicóptero	Jet Fuel	195 kg	144 min	72 km/h
Scout B-330 UAV Helicopter	Helicóptero	Gasolina	50 kg	180 min	60 km/h

Tabla 4.17: Especificaciones de la flota heterogénea. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de DPI UAV y aeroscout.

En la solución óptima se activan 4 drones Scout B-330 UAV Helicopter y 1 dron Hawk y la ruta solución se muestra en la Figura 4.15. Para facilitar la lectura de este gráfico, en la descripción de las rutas de la Tabla 4.18 se incluye la secuencia de nodos de cada una de ellas.

Ruta	Dron	Distancia	Tiempo	Carga
Dep. - 2 - 4 - 5 - 1 - 13 - Dep.	DP-14 Hawk	93,25 km	78 min	194 kg
Dep. - 8 - 9 - Dep.	Scout B-330 UAV Helicopter	61,27 km	62 min	50 kg
Dep. - 14 - 6 - 11 - Dep.	Scout B-330 UAV Helicopter	80,76 km	81 min	49 kg
Dep. - 7 - 12 - Dep.	Scout B-330 UAV Helicopter	79,68 km	80 min	49,5 kg
Dep. - 3 - 10 - Dep.	Scout B-330 UAV Helicopter	69,76 km	70 min	50 kg

Tabla 4.18: Características de la solución (Flota heterogénea). Fuente: Elaboración propia.

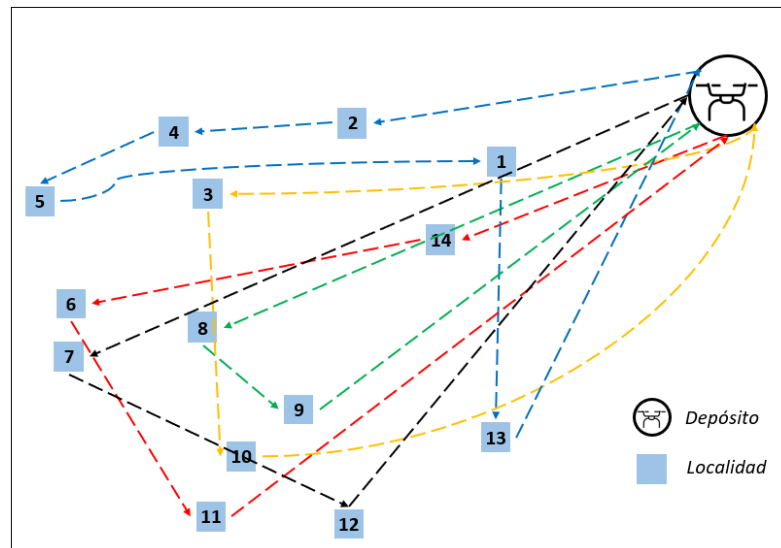


Figura 4.15: Ruta solución (Flota heterogénea). Fuente: Elaboración propia.

Aunque se debería tener en cuenta los costes de activación y uso de cada uno de los modelos, en la solución con flota heterogénea el tiempo de operación es de 81 minutos y en los drones se utiliza prácticamente toda su capacidad de carga.

De la resolución en los diferentes escenarios se puede concluir que los UAVs del tipo helicóptero no tripulado son una mejor opción que los eléctricos multirrotor. Estos últimos, ralentizan la operación de abastecimiento a núcleos incomunicados debido a las esperas para la recarga. Sin embargo, es probable que en un futuro se quiera reducir la contaminación que los drones con propulsión a gasolina o jet fuel producen, impidiendo el vuelo de estos o minimizando las operaciones que realizan. En este sentido, es factible distribuir cantidades de mercancía no muy grandes con una flota de 3 o 4 drones eléctricos, necesitando una flota superior para cantidades grandes de demanda.

Tanto para los casos estudiados como para probabilidades de demanda mayores o mercancía más pesada que requieran incorporar más drones, habría que realizar un estudio de rentabilidad que compare el coste de la flota de los drones con el coste de la utilización del helicóptero de emergencias. No se han podido obtener datos para realizar la comparativa, con lo que se marca como una línea futura de trabajo.

Capítulo 5

Conclusiones

Gracias a un crecimiento constante del sector de los drones, aparecen aplicaciones en las que estos aparatos están sustituyendo el método convencional de realizarlas, en su mayoría en el sector logístico.

La publicación del Real Decreto 1036/2017, la legislación vigente que regula la utilización civil de las aeronaves, nace para adecuarse a esta circunstancia. Ahora, es posible el sobrevuelo de ciudades y aglomeraciones de personas, el vuelo nocturno o volar en espacio aéreo restringido. Además, tras publicarse el Plan Estratégico para el desarrollo del sector 2018-2021, el Gobierno de España muestra las intenciones de adaptarse al ritmo de crecimiento del sector e impulsar su desarrollo. En dicho documento se proponen también determinadas iniciativas, como establecer un marco regulatorio futuro que contemple las nuevas aplicaciones que están surgiendo.

En Europa, el Proyecto U-Space trata de establecer un sistema de gestión del tráfico aéreo. Bajo principios como la seguridad para los usuarios del espacio aéreo, se quiere habilitar una alta densidad de operaciones con drones automatizados. Para ello, han de superarse varias fases, la primera de las cuales (labores de registro e indentificación) debe implantarse a todos los efectos en 2019. Fases más avanzadas como la gestión de operaciones deben testarse antes de la completa digitalización y automatización del proyecto.

Dentro de estas fases de gestión de operaciones, aprobación de planes de vuelo, etc., se enmarcan las pruebas que empresas como Amazon o UPS están llevando a cabo. La primera centrándose en el reparto de última milla de pequeña paquetería con drones que salen de sus almacenes, y la segunda haciendo lo propio con un sistema de reparto conjunto entre camión y dron. Asimismo, también destacan aplicaciones como el envío de medicamentos o traslado de muestras, que se encuentran bastante asentadas.

Para llevar a cabo de forma eficiente estas operaciones, es necesario por tanto tener planes de vuelo establecidos que minimicen los costes en el primer caso, y el tiempo de entrega en el caso de los medicamentos. En esta línea, en el campo de la investigación operativa se están desarrollando modelos de programación matemática para el diseño de rutas, la mayoría centradas en el reparto de última milla, y problemas de localización de las bases de lanzamiento.

Es aquí donde hace énfasis este proyecto, ya que tras hacer una revisión de la literatura, se concluye que la mayoría de modelos no consideran el consumo de batería de los UAVs. Por consiguiente, se realiza

la formulación de tres modelos de diseño de rutas, un modelo convencional, uno extendido que pone limitación al consumo de batería durante la ruta, y un último modelo que hace un seguimiento más detallado de la batería y considera además estaciones de recarga.

Para testar los modelos en un caso real, se estudian las zonas con tendencia a quedar aisladas en la provincia de Teruel, delimitando finalmente una zona de cobertura que incluye aquellas localidades que cumplen con la legislación vigente, con el objetivo de establecer una red de envío de mercancía a dichas zonas y poder desahogar en favor del resto de sus funciones al helicóptero de emergencias (método actual de distribución).

Tras implementar los modelos en el software de optimización CPLEX Studio, se resuelven bajo diferentes escenarios. Atendiendo a la tipología de la demanda así como a las características técnicas de las aeronaves, resultan ser tres escenarios finalmente: periodos cortos con demanda puntual de medicamentos, periodos de duración media con demanda mixta de medicamentos y productos de primera necesidad y un último de periodos largos y alta demanda.

Se concluye que para cada uno de los casos existen los modelos de drones necesarios, desde modelos eléctricos para los dos primeros escenarios, hasta un modelo de propulsión convencional de jet fuel especializado para dichas tareas en el último de ellos.

El inconveniente de los modelos eléctricos, debido a una autonomía algo limitada, es el tiempo que emplean en la recarga. De aquí se deduce que en situaciones en las que prima el tiempo de operación, es mejor emplear una flota con mayor número de drones de gran autonomía a una flota de un sólo dron con la carga equivalente al resto pero de menor autonomía.

En el caso de alta demanda, la utilización de UAVs en forma de helicóptero no tripulado y propulsión de jet fuel es la mejor opción, ya que estas aeronaves disponen de gran capacidad de carga y mucha mayor autonomía.

Otra de las conclusiones que se extraen es que la información que facilitan los fabricantes se percibe insuficiente. En el caso del consumo de batería o combustible, se proporcionan datos de autonomía en kilómetros o en tiempo, independientemente de la carga que transporten, algo irreal y que de otro modo aportaría más riqueza a los modelos propuestos. Del mismo modo, tampoco se ofrecen datos del coste de los vehículos aéreos, lo que imposibilita cualquier intento de realizar un estudio de rentabilidad económica frente al coste de utilización del helicóptero de emergencias. Ambas consideraciones se toman como línea futura de investigación.

Por último, en cuanto a la programación de los modelos en el software, los primeros modelos aportan soluciones en un tiempo razonable. Por contra, el modelo más complejo tarda en completar la resolución varias horas ante cantidades elevadas de localizaciones o de drones. Por tanto, si la aplicación tuviera visos de convertirse en una aplicación para determinar en tiempo real y con la mayor rapidez posible en qué orden atender a los habitantes, habría que aplicar métodos heurísticos, algo que al igual que lo comentado anteriormente queda marcado como línea futura de investigación.

Bibliografía

- [1] España. Real Decreto 1036/2017, de 15 de diciembre, por el que se regula la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto, y se modifican el Real Decreto 552/2014, de 27 de junio, por el que se desarrolla el Reglamento del aire y disposiciones operativas comunes para los servicios y procedimientos de navegación aérea y el Real Decreto 57/2002, de 18 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de Circulación Aérea. *Boletín Oficial del Estado*, 29 de diciembre de 2017, núm. 316.
- [2] Ministerio de Fomento. Plan Estratégico para el desarrollo del sector civil de los drones en España 2018-2021.
- [3] SESAR Joint Undertaking. *U-Space Blueprint*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017.
- [4] Amazon. *Amazon Prime Air*. Recuperado de (<https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?ie=UTF8&node=8037720011>). *Último acceso el 28/08/2018*.
- [5] CORREOS. *CORREOS inicia las pruebas con drones para facilitar el servicio en zonas de difícil acceso y condiciones climáticas adversas*. Recuperado de (https://www.correos.es/ss/Satellite/site/info_corporativa-1363190276152-contenidos_multimedia/detalle_noticia-sidioma=es_ES). *Último acceso el 28/08/2018*.
- [6] Swiss Post (14/03/2017). *Swiss Post is planning to use drones for the Ticino hospital group in Lugano*. Recuperado de (<https://www.post.ch/en/about-us/company/media/press-releases/2017/swiss-post-is-planning-to-use-drones>). *Último acceso el 28/08/2018*.
- [7] Swiss Post (22/06/2018). *Drone to transport laboratory samples across Lake Zurich*. Recuperado de (<https://www.post.ch/en/about-us/company/media/press-releases/2018/drone-to-transport-laboratory-samples-across-lake-zurich>). *Último acceso el 28/08/2018*.
- [8] Zipline. *How Zipline Works*. Recuperado de (<http://www.flyzipline.com/service/>). *Último acceso el 28/08/2018*.
- [9] Hillier, F., Lieberman, G. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones (Novena edición)*. México: Mc Graw Hill.
- [10] Chase C. Murray and Amanda G. Chu. The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 54:86 – 109, 2015.

- [11] Aaron Pulver and Ran Wei. Optimizing the spatial location of medical drones. 90:9–16, 01 2018.
- [12] David Afshartous, Yongtao Guan, and Anuj Mehrotra. Us coast guard air station location with respect to distress calls: A spatial statistics and optimization based methodology. 196:1086–1096, 08 2009.
- [13] Ryan G Conrad and Miguel Figliozzi. The recharging vehicle routing problem. *Proc. of the 61st Annual IIE Conference*, 01 2011.
- [14] Jane Lin, Wei Zhou, and Ouri Wolfson. Electric vehicle routing problem. *Transportation Research Procedia*, 12:508–521, 2016.
- [15] Joshua K. Stolaroff, Constantine Samaras, Emma R. O’Neill, Alia Lubers, Alexandra S. Mitchell, and Daniel Ceperley. Energy use and life cycle greenhouse gas emissions of drones for commercial package delivery. 9(1):409, 2018.
- [16] Asociación Española de la Carretera. Estudio sobre Necesidades de Inversión en Conservación. (España). 2016.
- [17] AEMET. *Valores climatológicos normales. Teruel*. Recuperado de (<http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos?l=8368U&k=arn>). *Último acceso el 28/08/2018*.
- [18] Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. *Red Natura 2000*. Recuperado de (<http://www.mapama.gob.es/es/biodiversidad/temas/espacios-protegidos/red-natura-2000/default.aspx>). *Último acceso el 28/08/2018*.
- [19] España. Decreto 187/2014, de 18 de noviembre, del Gobierno de Aragón, por el que se aprueba el Plan de Protección del Paisaje Protegido de los Pinares de Rodeno. *Boletín Oficial de Aragón*, 28 de noviembre de 2014, núm. 234, pp. 37611-37645.

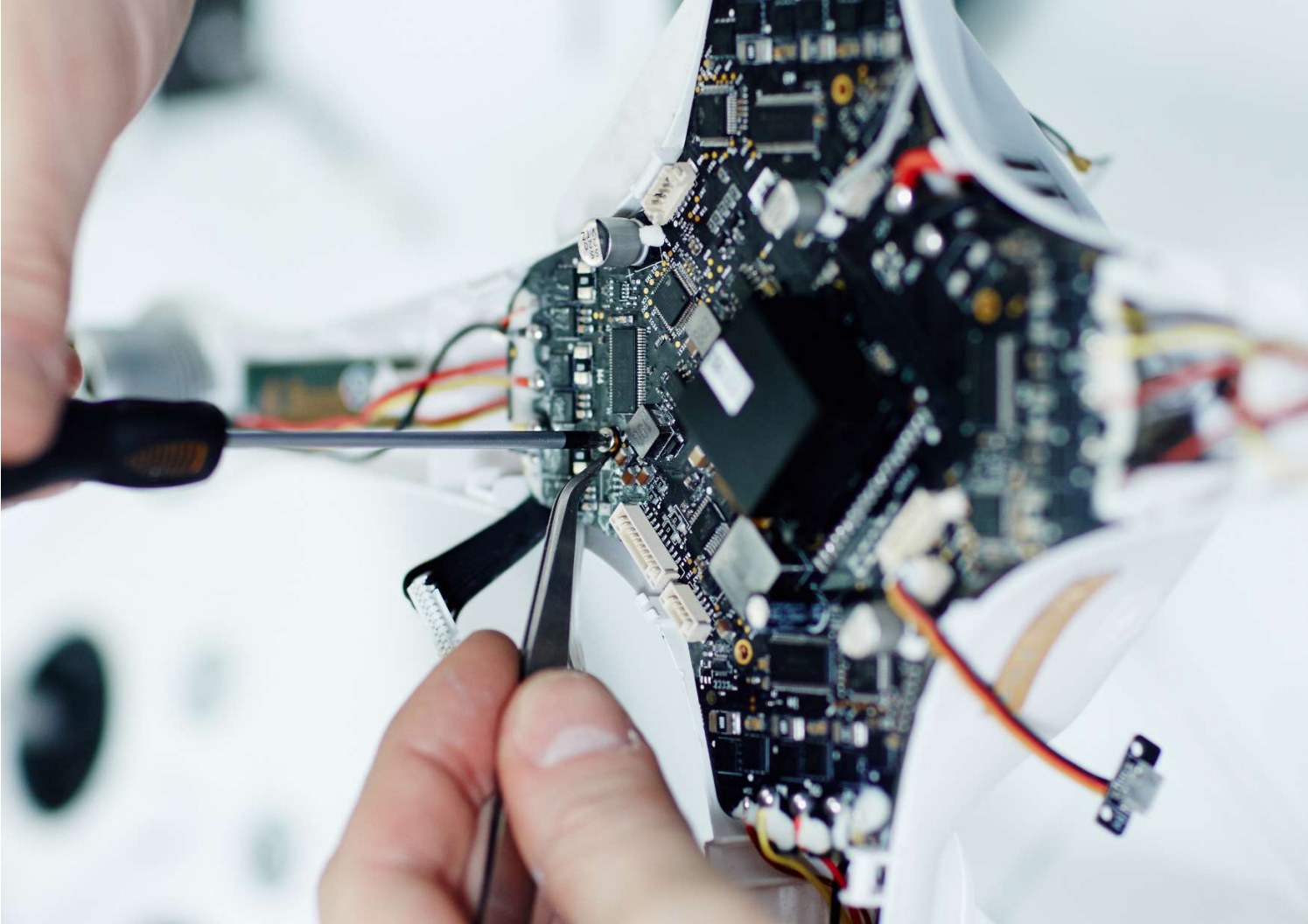
Anexo I. Plan Estratégico para el desarrollo del sector civil de los drones en España 2018-2021

En este anexo se han extraído algunas páginas del Plan Estratégico para el desarrollo del sector civil de los drones en España 2018-2021 que contribuyen a explicar cuál se espera sea el desarrollo civil de los drones en España en el futuro más cercano.

En primer lugar, en las primeras 5 páginas se muestra los proyectos de I+D+i que se están llevando a cabo tanto en España como en Europa, así como la asignación de fondos para los mismos.

En segundo lugar, se incluyen las páginas correspondientes a los 4 ejes estratégicos que se comentaron en la Sección 2.1.2.

Por último, las 3 páginas finales hacen referencia a las iniciativas que en el plan se proponen para la consecución de los ejes estratégicos.



2.4. La Innovación como pieza clave para el desarrollo del sector

En un sector como el de los drones, en el que el desarrollo de tecnología, desempeña un papel esencial para su crecimiento, la innovación cobra un papel principal, tanto en los procesos de diseño y fabricación de nuevas plataformas, equipos y software, como en la búsqueda de nuevas aplicaciones que permitan expandir los horizontes de este tipo de aeronaves.

En la actualidad, Estados Unidos y Europa están a la cabeza de los proyectos de investigación que se agrupan en grandes programas en los que participan organismos, instituciones y empresas tanto del sector público como privado. España asume un papel relevante dentro de los programas europeos a través de sus empresas y centros de investigación.

En este apartado se detallan las principales fuentes de financiación de la inversión en I+D+i así como el nivel de inversión en este sector, fundamentales para su desarrollo.

EEUU y Europa a la cabeza de la investigación en drones

En Estados Unidos, la FAA es el organismo encargado de coordinar todas las actividades de I+D que realiza la industria, las Universidades y otros organismos gubernamentales en el campo de drones, con el objetivo de dar soporte al desarrollo de legislación, estándares de calidad, políticas y recomendaciones para la operación de drones.

Todas las actividades se integran dentro del programa NextGen, iniciado en 2010 y que persigue el desarrollo de las tecnologías y los conceptos operativos

para la aviación del futuro de la que formarán parte, cada vez con más protagonismo, las aeronaves no tripuladas. Las tareas de investigación se asignan entre una red de 22 universidades, a través del programa ASSURE¹⁹ y están siendo coordinadas por la Universidad del Estado de Mississippi²⁰.

Además de esta iniciativa, cabe destacar el acuerdo con el centro de I+D+i de la NASA en el desarrollo de tecnologías UTM para la integración segura de drones en el espacio aéreo a baja altura así como en el resto del espacio aéreo y para el desarrollo de sistemas autónomos de respuesta del dron en caso de fallo, que garantizan un comportamiento seguro de la aeronave ante la pérdida de la señal de control o ante fallos críticos de sus sistemas.

El equivalente europeo al programa NextGen es el programa SESAR. La relación de SESAR con las aeronaves no tripuladas comenzó a finales de 2013 con el objetivo de definir la futura integración de los UAS(Unmanned Aircraft Systems) en el espacio aéreo. Desde entonces los trabajos se han desarrollado en 2 ámbitos; el primero, que persigue integrar los drones en espacio aéreo con vuelos IFR como una aeronave más y el segundo, en una fase preliminar actualmente, que persigue desarrollar la operación con seguridad a baja altura, integrada con los vuelos visuales de las aeronaves tripuladas.

De entre estos proyectos en el marco de SESAR, destacan los asociados a la convocatoria H2020-SESAR-2016-1 cuyo fin es establecer las bases del nuevo paradigma de las operaciones de drones en Europa y los que resultarán de la reciente convocatoria de enero de 2018, cuyo fin es la creación de demostradores del sistema U-Space en diferentes emplazamientos de Europa.

Título	Acronimo
Advanced Integrated RPAS Avionics Safety Suite	AIRPASS
Sense and avoid technology for small drones	PercEvite
DRone European AIM Study	DREAMS
Clear Air Situation for uas: Maturing ground based technologies for a real-time Unmanned Aerial System Traffic Management System	CLASS
Drone Critical Communications	DroC2om
Concept of Operations for European UTM Systems	CORUS
Information Management Portal to Enable the Integration of Unmanned Systems	IMPETUS
Technological European Research for RPAS in ATM	TERRA
An Integrated Security Concept for Drone Operations	SECOPS

Tabla 4. Lista de proyectos de investigación más importantes promovidos por SESAR para el desarrollo del sector de drones.

Periodo de ejecución 2017-2019

Fuente: <http://cordis.europa.eu>

¹⁹ ASSURE: Alliance for System Safety of UAS through Research Excellence

²⁰ Center of Excellence for UAS

España ha sabido posicionarse por méritos propios en un lugar destacado a la hora de participar en los principales proyectos impulsados por SESAR. Ello se debe en gran medida a la competitividad de las diferentes empresas y entidades investigadoras de nuestro país. Entidades públicas como es el caso del INTA²¹, fundaciones como FADA²² y Centros Tecnológicos, junto a Universidades, son las que concentran el esfuerzo investigador del sector además de los departamentos de Investigación y Desarrollo de las empresas.

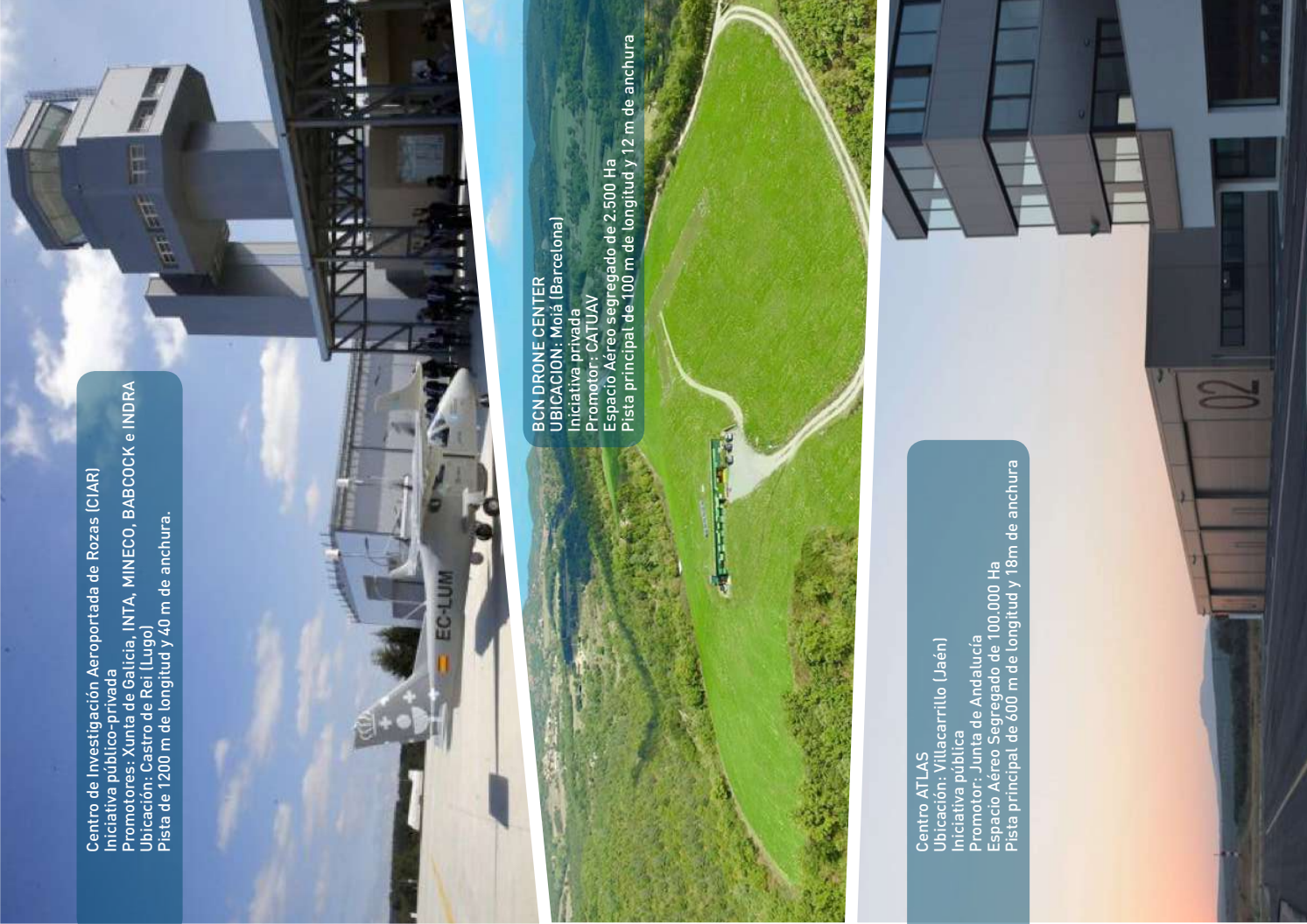
Plan de Innovación para el Transporte y las Infraestructuras

2017-2020

En el ámbito nacional, el Ministerio de Fomento ha elaborado el Plan de Innovación para el Transporte y las Infraestructura que materializa una apuesta ambiciosa para consolidar a España en una posición de liderazgo internacional en dichas materias a través de la innovación, con el usuario final como centro del proceso y con la participación de toda la sociedad. El Plan del sector de drones se ha enfocado como un complemento a este, recogiendo sus líneas maestras y añadiendo nuevas iniciativas específicas del sector.

De manera paralela al desarrollo de los programas de investigación sobre drones, los países pioneros han detectado la necesidad de disponer de unos centros específicos: los aeródromos especializados para UAS. Estos centros constituyen la base en el desarrollo de nuevas soluciones y prototipos de aeronaves ya que posibilitan la realización de vuelos experimentales en un espacio aéreo segregado al que no le aplican las restricciones operativas generales existentes. Su función es la de actuar como catalizadores del sector, concentrando empresas de diferentes ámbitos (formación de pilotos, mantenimiento, diseño, fabricación e investigación) y ofreciendo las condiciones idóneas desde un punto de vista operativo y logístico.

España cuenta en la actualidad con tres de estas infraestructuras que la sitúan en una posición ventajosa frente a otros socios europeos. Estos aeródromos son El Centro de investigación del Aeródromo de Rozas en Castro de Rei (Lugo), el Centro ATLAS en Villacarrillo (Jaén) y el BCN Drone Center en Moiá (Barcelona).



Centro de Investigación Aeroportada de Rozas (CIAR)
Iniciativa público-privada
Promotores: Xunta de Galicia, INTA, MINECO, BABCOCK e INDRA
Ubicación: Castro de Rei (Lugo)
Pista de 1200 m de longitud y 40 m de anchura.

BCN DRONE CENTER
UBICACIÓN: Moiá (Barcelona)
Iniciativa privada
Promotor: CATUAV
Espacio Aéreo segregado de 2.500 Ha
Pista principal de 100 m de longitud y 12 m de anchura

Centro ATLAS
Ubicación: Villacarrillo (Jaén)
Iniciativa pública
Promotor: Junta de Andalucía
Espacio Aéreo Segregado de 100.000 Ha
Pista principal de 600 m de longitud y 18m de anchura

PAIS	NUMERO DE AERODROMOS	CARACTERISTICAS
Francia	5	Gestionado por CESA (Centre d'Essais et de Services sur les systèmes autonomes) Espacio aéreo segregado hasta 2000 pies de altitud.
España	3	Ver página siguiente.
Reino Unido	2	Gestionado por NAC (National Aeronautical Centre) Pruebas de integración en espacio aéreo con aeronaves tripuladas.
Alemania	1	Gestionado por DEU (Deutsches Erprobungs geländes für Unbemanntes Fliegen).
Italia	1	La pista permite el ensayo con prototipos de gran tamaño.
Holanda	1	También realiza la formación de pilotos.
Dinamarca	1	Espacio aéreo segregado de 867 km² de superficie y 3500 pies de altitud.

Tabla 5. Datos sobre principales aeródromos especializados en UAS europeos.
Fuente: Elaboración propia.

²¹ INTA. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.
²² Fundación Andaluza para el Desarrollo Aeroespacial.

La financiación del I+D+i en España

La apuesta por la innovación como soporte del crecimiento empresarial requiere disponer de fuentes de financiación accesibles para que las empresas puedan afrontar el desarrollo de soluciones tecnológicas encaminadas a mejorar sus productos y servicios. El potencial de las empresas se basa en su capacidad de adecuarse de manera muy ágil a los avances tecnológicos e incluirlos en sus procesos productivos. Este aspecto es especialmente relevante en el ámbito de los drones, cuyo crecimiento está muy vinculado a las mejoras tecnológicas.

En general, en el ámbito del I+D+i, el mayor esfuerzo inversor en España en las dos últimas décadas ha sido asumido por las empresas, y se ha situado siempre por encima del 50%, seguido por el realizado por la Enseñanza Superior (en torno al 30%) y en último lugar por la Administración Pública (en torno al 20%).

En materia de innovación, España ha mejorado paulatinamente su posición²³ situándose entre los países más eficientes a la hora de gestionar los procesos de investigación y desarrollo. Nuestro país ha sido capaz de posicionarse en los primeros puestos del sector de los drones a pesar de no estar entre los primeros puestos en el ranking por volumen de inversión en programas de investigación y desarrollo. Ello indica que aún tenemos margen de mejora y da cuenta del gran potencial de nuestro sector.

Son tres las principales fuentes de financiación con las que cuentan las empresas: la autofinanciación, mediante fondos propios; la financiación de otras entidades privadas y fondos y las subvenciones y otras ayudas provenientes de la Administración Pública.

Volumen de inversión I+D+i en España

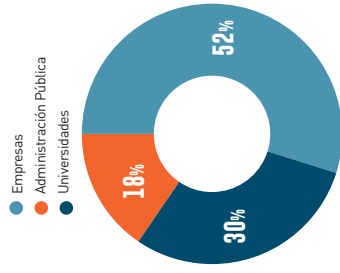


Figura 33: Resumen de fuentes de financiación de I+D+i en España.

Fuente: Informe COTEC 2017

Como se ha indicado ya, las empresas que operan en España financian con recursos propios la mayor parte de la inversión en I+D+i. En este sentido cabe señalar que dicha financiación alcanzó en 2015, un 65%²⁴ del nivel total de sus inversiones.

Con respecto a los fondos de financiación privada, éstos se generan en gran medida por empresas con capacidad inversora que buscan en desarrolladores tecnológicos soluciones para mejorar sus productos y servicios. Los modelos de contraprestación a estas empresas varían en función a la naturaleza del proyecto, pudiendo ofrecerse tanto la participación accionarial como un reparto de los beneficios.

Uno de los retos para estimular la financiación privada en I+D+i durante los próximos años, es lograr atraer a entidades de capital riesgo mediante iniciativas como el programa Invierte del CDTI (Centro de Desarrollo Tecnológico Industrial). Este programa se puso en marcha en el año 2012 y logró atraer a 7 fondos de inversión que comprometieron 274 millones de euros hasta el 2016.

Finalmente, en relación con la financiación pública a las que las empresas españolas tienen acceso, cabe destacar tres niveles de financiación en función del origen y la gestión de los fondos: programas de cooperación internacional, programas de financiación europea e iniciativas de financiación nacional.

Dentro del primer tipo, se encuadran programas de cooperación en materia de I+D+i empresarial como EUREKA²⁵ o IBEROEKA²⁶ donde cada país financia a su participante. El CDTI es la entidad española que centraliza la promoción y financiación de estos programas entre las empresas españolas. En el ámbito

Fuentes de financiación I+D+i empresarial

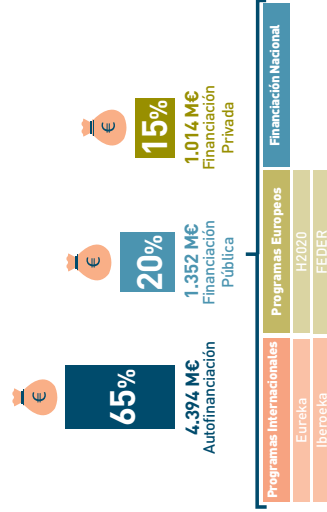


Figura 33: Resumen de fuentes de financiación de I+D+i en España.

Fuente: Informe COTEC 2017

europeo, la principal iniciativa de financiación directa de la I+D+i empresarial es el Programa Marco de I+D+i, Horizonte 2020 en su actual edición. De forma indirecta, la Unión Europea también estimula la I+D+i mediante los fondos FEDER que asigna a diversos organismos para su gestión a nivel nacional.

A nivel nacional, la Secretaría de Estado de I+D+i (SEI-DI) del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, pone en marcha diversas convocatorias de subvenciones, incentivos fiscales y herramientas de financiación entre las que destaca la Compra Pública Innovadora. Asimismo, dentro del fomento del I+D+i empresarial cabe destacar la importante tarea realizada por el CDTI a la hora de facilitar financiación, de asesorar técnicamente a las empresas y apoyar en el acceso a otras fuentes de financiación públicas, como el citado programa comunitario H2020. Los proyectos de I+D+i financiados por el CDTI comprenden tanto actividades de investigación industrial como de desarrollo experimental y están orientados a la creación y/o mejora significativa de procesos productivos, productos o servicios, lo que se traduce en un valor añadido a la sociedad, una mejora en las expectativas de crecimiento y un aumento en la competitividad de nuestro país.

La financiación pública de proyectos de I+D+i del sector de drones en España

Como se ha indicado, aproximadamente el 20% de la financiación de proyectos de I+D+i en España provee-

ne de fuentes públicas. Dentro de ellas destacan por su peso específico las de origen comunitario, principalmente el programa H2020 y los fondos FEDER.

Horizonte 2020 es el instrumento financiero creado por la Comisión Europea para financiar y poner en marcha la "Unión por la Innovación", cuyo fin es mejorar el acceso a la financiación de los proyectos I+D+i y que éstos puedan dar lugar a productos y servicios que favorezcan el crecimiento y la generación de empleo.

Los Fondos Europeos para el Desarrollo Regional (FEDER), cuyo objetivo principal es fortalecer la cohesión socioeconómica dentro de la Unión Europea, tienen entre sus prioridades clave el apoyo a la actividad y desarrollo de las pequeñas y medianas empresas, la promoción de la investigación e innovación, el fomento de la calidad en el empleo y la transición hacia una economía baja en emisiones de carbono.

La Secretaría de Estado de I+D+i (SEIDI), designada Organismo Intermedio del Fondo Europeo de Desarrollo Regional, ha habilitado parte de dichos fondos para la financiación de proyectos I+D+i del sector civil de drones a los que añade su propia contribución. Por su parte el CDTI también ha contribuido a este apoyo con fondos propios complementados con aportaciones menores de los fondos FEDER.

En este apartado se detallan las principales cifras de la financiación pública que se ha destinado a proyectos de I+D+i asociados al uso civil de drones en los últimos años en España.

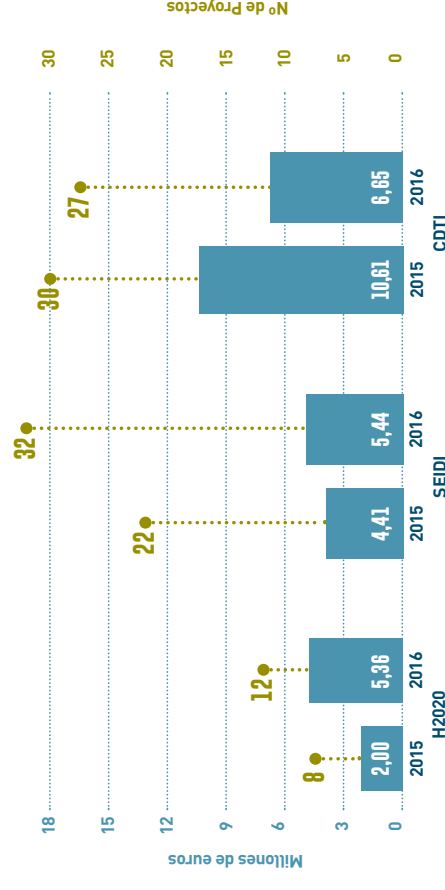


Figura 34: Cifras de financiación pública de proyectos I+D+i de drones de uso civil. Fuente: Elaboración propia. Datos H2020, SEIDI y CDTI.

²³ España se encuentra en la posición 28 de 127 en el informe "The Global Innovation Index" de 2017, con un valor de IDC=468,1, lo que la sitúa en el puesto 18 entre los países europeos, y un coeficiente de eficiencia de 0,7.

²⁴ Informe COTEC 2017

²⁵ Iniciativa multilateral para impulsar la competitividad de la industria europea mediante la financiación de proyectos empresariales de I+D+i cooperativa internacional. Iniciados al mercedo.

²⁶ Programa de Apoyo a la Cooperación Tecnológica Empresarial en Iberoamérica

Horizonte 2020

El acceso a la financiación dentro de este programa suele llevarse a cabo a través de un consorcio de empresas y/o entidades de investigación de diferentes países, en el que uno de los socios asume las labores de coordinación, asegurando la alineación de todos los participantes con los objetivos del proyecto. En este sentido las empresas del sector español asumen actualmente tanto las tareas de coordinación como las de investigación en programas del Horizonte 2020.

Así, durante el trienio 2015-2017²⁷ España ha desempeñado labores de coordinación en 17 de los 31 proyectos relacionados con el sector de los drones en los que colaboró alguna empresa u organismo público español. Dicha coordinación es muy relevante porque da gran visibilidad a la empresa española. La suma de los presupuestos de los proyectos en los que ha intervenido alguna entidad española ascendió a más de 149 millones de euros y la financiación recibida por las empresas nacionales superó los 11 millones de euros.

	Número de proyectos	Financiación recibida por las empresas españolas (M€)
Proyectos coordinados	17	5,0
Proyectos participados	14	6,8
Total	31	11,8

Tabla 6. H2020. Los proyectos coordinados y participados por empresas españolas.2015-2017.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de H2020.



Fotografía cedida por cortesía de Drone Hopper

²⁷ 2017 incluye los proyectos con comienzo previsto en octubre

Fondos gestionados por SEIDI

La cuantía de los proyectos de financiación aprobados por SEIDI para la I+D+i del sector de las aeronaves no tripuladas durante los años 2015 y 2016 se ha cifrado en torno a los 5 millones de euros anuales. El principal aporte proviene de fondos propios y se complementa con fondos FEDER que han supuesto un 11% del total financiado durante dichos años.

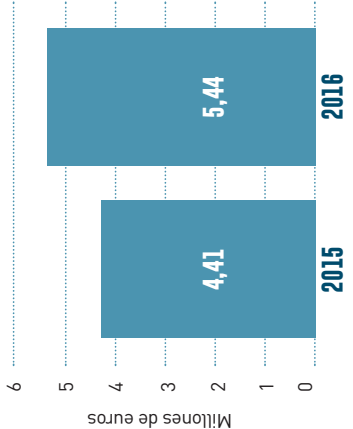


Figura 37: Fondos SEIDI. Financiación al sector de las aeronaves no tripuladas.
Fuente: Elaboración propia con datos de SEIDI.

SEIDI dispone de 3 tipos de soporte financiero para las empresas: la subvención, el crédito y el anticipo, que pueden ser otorgados de forma simultánea. La concesión de un crédito es la forma de financiación más habitual.

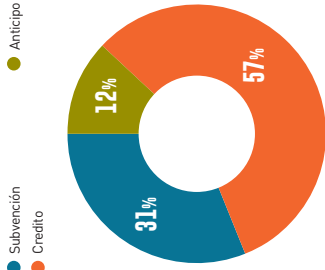


Figura 38: Financiación SEIDI. Tipología de soporte financiero.
Fuente: Elaboración propia con datos de SEIDI.

Los proyectos financiados por H2020 dentro del sector de los vehículos aéreos no tripulados engloban todos los aspectos de su ecosistema tecnológico. De entre las diferentes partes destaca la financiación recibida para investigación en el desarrollo de plataformas aéreas y en los sistemas de navegación aérea que mejoran el posicionamiento y control de la aeronave.



Figura 35: H2020. % Financiación recibida por España. Por subsistemas. 2015-2017.
Fuente: Elaboración propia con datos de H2020.

Dentro de los sectores específicos a los que se ha dirigido la financiación del Horizonte H2020 destaca el gran esfuerzo financiador en todos los campos relativos a la integración de los drones en el Espacio Aéreo (EA), siguiendo en importancia ámbitos como la seguridad, el salvamento y el sector audiovisual, que suman entre los 4 casi el 40% del presupuesto total financiado.



Figura 36: H2020. % Financiación recibida por España.Sectores. 2015-2017.
Fuente: Elaboración propia con datos de H2020.

Durante los años 2015 y 2016 los Fondos gestionados por SEIDI en relación con el sector de los drones tuvieron un total de 46 beneficiarios, siendo la mayor parte de ellos empresas y universidades.

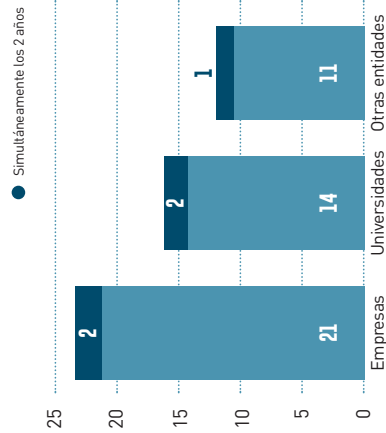


Figura 39: Financiación SEIDI. Número de participantes (2015-2016). Fuente: Elaboración propia con datos de SEIDI.

En 2015 y 2016 destacan junto con el sector de la seguridad los sectores alineados con la estrategia sectorial de FEDER (Agricultura, Obra Civil e Industrial).

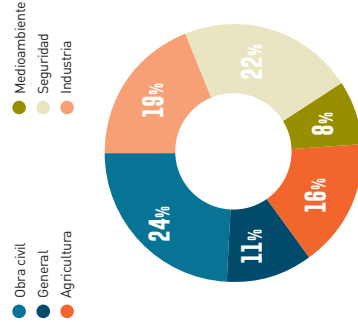


Figura 41: Financiación SEIDI. Inversión sectorial. 2015 y 2016. Fuente: Elaboración propia con datos de SEIDI.

Proyectos financiados por el CDTI

El CDTI emplea fuentes de financiación propias complementadas con fondos FEDER. Desde 2010, el CDTI ha apoyado a las empresas del sector con una financiación de más de 70 millones de euros. En particular, en 2015 y 2016, destinó cerca de 20 millones de euros.

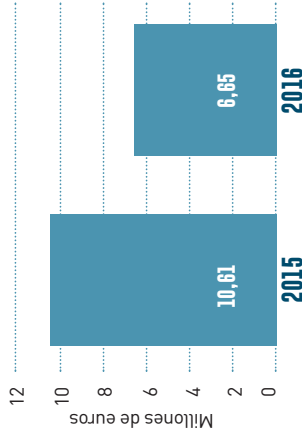


Figura 40: CDTI. Financiación del sector de los drones. 2015-2016. Fuente: Elaboración propia con datos de CDTI.

Esta financiación ha sido aprovechada por más de 90 empresas, en su mayor parte (58%) pymes del sector. La financiación directa ha sido la fórmula más habitual, que en los últimos 10 años ha alcanzado de media el 75% del presupuesto de los proyectos.

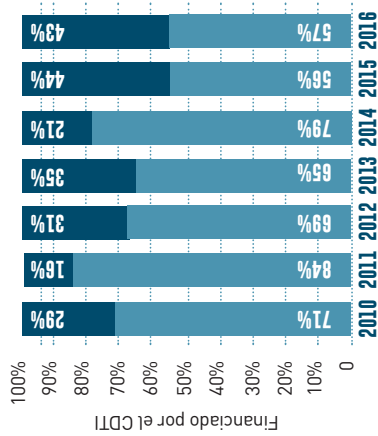


Figura 42: CDTI. % medio del presupuesto de proyecto financiado por CDTI 2010-2016. Fuente: Elaboración propia con datos de CDTI.

Ejemplo de la financiación público-privada. El Proyecto CIAR-Galicia y el UAV's Initiative

Dentro de las actuaciones de financiación mediante la fórmula de colaboración público-privada de "Compra Pública Innovadora" destacan el Proyecto CIAR, y el UAV's Initiative.

El proyecto CIAR surgió para cubrir la necesidad de desarrollar una infraestructura dotada de un espacio aéreo segregado donde se pudieran realizar trabajos de investigación en el desarrollo de prototipos de aeronaves no tripuladas y de sistemas para su integración en el espacio aéreo.

Esta nueva infraestructura se materializó a través del acondicionamiento del aeródromo de Rozas (Lugo) y ha constituido uno de los mejores ejemplos de aplicación de la figura de "Compra Pública de Innovación", permitiendo realizar a la Administración, junto a la iniciativa privada, una de las mayores actuaciones dentro del sector de los vehículos aéreos no tripulados.

Otro aspecto a destacar del proyecto CIAR es que la participación del sector público fue realizada de forma conjunta por instituciones del Estado y autonómicas. Así, colaboraron por parte de la Administración estatal el Ministerio de Economía y Competitividad junto con el INTA mientras que por parte de la Comunidad Autónoma de Galicia apoyaron el proyecto la Xunta de Galicia y el Instituto Galego de Innovación.

La inversión total del proyecto ascendió a 14,9²⁸ millones de euros de los que la Administración del Estado aportó 34 a través de fondos FEDER, la Administración autonómica 40 y el resto fue aportado por la iniciativa privada formada por las empresas Indra y Babcock.

Esta iniciativa, permitió la creación de 120 puestos de trabajo asociados, la firma de 15 contratos con Pymes y universidades y el desarrollo de 20 proyectos relacionados con plataformas aéreas y marítimas²⁹.

En el marco de la política de promoción del centro tecnológico del Aeródromo de Rozas (Lugo), el gobierno gallego impulsó también el programa Civil UAVs Initiative. A través de esta iniciativa se pretenden mejorar la prestación de determinados servicios públicos de la Administración Gallega en diferentes sectores: lagrario, forestal, marítimo, medio ambiental y de gestión del territorio y del patrimonio) mediante la explotación de las potencialidades de los sistemas aéreos no tripulados.



Fotografía cedida por cortésia de CIAR

● FEDER
● Xunta de Galicia
● Indra y Babcock

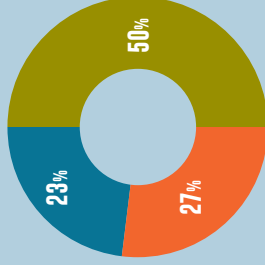


Figura 43: Fuentes de financiación e importes financiados. Fuente: Elaboración propia con datos de la Xunta de Galicia.

El proyecto tiene un plazo de ejecución de 3 años y un presupuesto de 24 millones de euros. Se formalizó en el año de 2016, a través de un convenio de colaboración entre el Ministerio de Economía y Competitividad, la Agencia Gallega de Innovación (GAIN) y la Agencia de Modernización, Tecnológica de Galicia (AMTEGA).

²⁸ Xunta de Galicia. "Caso de éxito de un proyecto CPT: Civil UAVs Initiative en Galicia".
²⁹ Entre otros destacan el proyecto TARIGOS: Aeronave opcionalmente tripulada para vigilancia y reconocimiento marítimo y los proyectos LUA y LUMES: Aeronaves desarrolladas para la lucha contra incendios forestales.

2.5. Diagnóstico

Al igual que en el resto del mundo, en nuestro país se ha identificado de manera clara la potencialidad de desarrollo del sector a lo largo de toda la cadena de valor, desde la fabricación de componentes a la prestación de servicios como demuestra el elevado número de operadores registrados y la creación en los últimos años de numerosas empresas fabricantes de aeronaves y sus sistemas.

Sin embargo, la juventud y el pequeño tamaño de la mayor parte de nuestras empresas hacen que se enfrenten a dificultades propias de su tamaño, como, por ejemplo, la obtención de financiación para realizar sus proyectos, factor a potenciar para su desarrollo. El aumento de tamaño de las empresas se identifica como un factor clave para mejorar su competitividad, su capacidad de inversión en I+D+i y su proyección exterior.

La tecnología de las aeronaves no tripuladas se ha identificado como una oportunidad de negocio clara para empresas dedicadas a sectores distintos del aeronáutico, que ven en esta tecnología alternativas que presentan ventajas respecto a las soluciones tradicionales. Previsiblemente, las empresas adoptarán este tipo de soluciones para la realización de parte de sus tareas. El importante número de operadores registrados en menos de 3 años es un síntoma del interés que despierta esta tecnología.

El nuevo marco normativo permitirá potenciar el desarrollo de estas empresas que podrán proporcionar un conjunto más amplio de servicios. Así, por ejemplo, la posibilidad de abordar nuevos modos de operación más allá de alcance visual del piloto, vuelos en entornos urbanos, etc. permitirá el desarrollo de nuevas aplicaciones, distintas de las más comunes en la actualidad (filmación y topografía). Por otra parte, en el medio plazo, el Reglamento Europeo aumentará, más si cabe, el tipo de operaciones permitidas y definirá un mercado común en toda la Unión Europea que facilitará la exportación a otros países de los servicios de nuestros operadores. Debemos implantar los procedimientos que faciliten y agilicen la operación de las empresas en condiciones de seguridad, porque ello favorecerá, sin duda, que nuestras empresas puedan crecer e innovar.

Nuestro país cuenta con empresas, entidades y profesionales de primer nivel que han situado a España en un lugar de referencia mundial. Estas han sabido aprovechar la apuesta firme de la Unión Europea por el desarrollo de este sector a través de la participación en sus proyectos de I+D. En gran medida, el objetivo de esta financiación europea es configurar el nuevo paradigma de la operación de drones, que pasa por el desarrollo de un sistema específico de gestión de tráfico aéreo para estas aeronaves y su coexistencia en el espacio aéreo con las tripuladas (U-Space). Nuestras empresas, que participan de

manera intensa en estos programas de investigación partirán con una clara ventaja competitiva y podrán posicionarse como líderes en Europa.

Muchas de las tecnologías necesarias para este nuevo escenario están iniciando su desarrollo y ello genera oportunidades de negocio a las que ya se están sumando algunas empresas de nuestro país.

Debemos continuar mejorando nuestro esfuerzo inversor en I+D+i para aproximarlo al de nuestros principales competidores, a través, por ejemplo, de programas de colaboración público-privadas que están dando frutos muy positivos en estos primeros años de este novedoso sector.

España cuenta con infraestructuras de ensayos especializadas de este tipo de aeronaves, que trabajan proactivamente junto con las empresas diseñadoras y fabricantes, y les ayudan a alcanzar sus objetivos: drones y tecnología embarcada capaz de operar en condiciones de seguridad. Es importante apostar por el desarrollo de estos centros facilitando las autorizaciones a las empresas para que puedan realizar pruebas en estos centros de experimentación y, de esta forma, desarrollar nuevas tecnologías, productos y aplicaciones.

Existe un gran potencial de desarrollo de soluciones adecuadas para la vigilancia y defensa frente a actos ilícitos realizados con drones. El desarrollo de este tipo de sistemas está cobrando cada vez más importancia en el mercado internacional, pero son muy pocas las soluciones que han sido desarrolladas por empresas españolas, por lo que ello supone una ventana de oportunidad que debemos aprovechar.

La oferta formativa relacionada con el sector se centra principalmente en la formación de pilotos y no está estandarizada. Fortalecer los programas de formación en materia de diseño de componentes, sistemas y su integración en plataformas aéreas facilitará la labor de las empresas tecnológicas españolas en el desarrollo de nuevos productos.

Es fundamental realizar labores de difusión entre la sociedad sobre los grandes beneficios que presenta esta tecnología y sobre la importancia del uso adecuado de estas aeronaves. De esta forma, a través de una adecuada concienciación, podremos conseguir la aceptación social necesaria que permitirá el desarrollo de esta actividad.

Nos encontramos, por tanto, ante un sector de gran pujanza y en el que las empresas españolas tienen mucho que decir en el panorama internacional. Por ello, es necesario poner todos los esfuerzos para transformar las pequeñas barreras detectadas en oportunidades y de esta forma reforzar nuestro tejido tecnológico, industrial y de servicios logrando así que esta nueva tecnología tenga un impacto positivo en la sociedad española en su conjunto.

4. Ejes estratégicos

El Plan Estratégico para el Desarrollo del Sector Civil de los Drones en España tiene como objetivo principal potenciar el desarrollo ordenado del sector, alineando el progreso tecnológico y la seguridad, favoreciendo el avance de sus múltiples aplicaciones en aras de la mejora y modernización de la sociedad. En este sentido, el Plan realiza una apuesta decidida por la tecnología y la innovación, persiguiendo el posicionamiento de liderazgo de nuestro país en el ámbito internacional.

Actualmente, el sector de los drones presenta un enorme potencial de desarrollo y transformación. Consolidar esta senda de crecimiento hace necesario establecer un marco general adecuado, que

aporte certidumbre y predictibilidad a los diferentes agentes del sector, a la vez que seguridad y privacidad a la ciudadanía, y que permita superar las barreras que existen en los ámbitos regulatorio, técnico, económico y social.

Con un presupuesto estimado de 15 millones de euros, este Plan Estratégico consta de 29 iniciativas que se enmarcan en 4 ejes estratégicos que plantean, respectivamente: la implantación del marco normativo actual y desarrollo de la normativa futura; el impulso al desarrollo empresarial y a la I+D+i del sector; la divulgación de información sobre el sector y, finalmente la coordinación entre las Administraciones involucradas en este segmento de actividad.



Eje Estratégico 1: Implantación del marco normativo actual y desarrollo de la normativa futura

El segmento de actividad de los drones, como parte del sector de aviación, se encuentra condicionado por el ámbito normativo, que persigue la consecución y mantenimiento de los más altos estándares de seguridad operacional.

En este sentido, para alcanzar todo el potencial de desarrollo del sector de forma que se favorezcan nuevas aplicaciones y la consolidación de las ya existentes, garantizando la seguridad y el respeto a los derechos individuales, se consideraba fundamental disponer de un avanzado marco normativo que sustituyese al marco regulatorio hasta entonces establecido (en la Ley 18/2014). Por ello, desde el Ministerio de Fomento se impulsó la elaboración de un nuevo Real Decreto que lo sustituyese y que fue aprobado por el Consejo de Ministros el pasado 15 de diciembre, el Real Decreto 1036/2017, por el que se regula la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto. Asimismo, este nuevo marco regulatorio debe ir acompañado del establecimiento de unos medios de cumplimiento y material guía que permitan al sector desarrollar su actividad en condiciones de eficiencia.

En el futuro, el marco regulatorio bajo el que se desenvolverá la actividad tendrá alcance europeo. Dicho marco se encuentra actualmente en fase de definición, por lo que se considera vital nuestra participación activa y de una forma destacada, con objeto de defender y trasladar los intereses de nuestro país. Asimismo, la participación en los programas de colaboración entre los socios europeos se identifica como una oportunidad para fomentar las sinergias y reforzar el papel de España en el ámbito internacional.

En definitiva, este Plan Estratégico debe promover la definición de un marco de actuación amplio, que abarque tanto las áreas de regulación como las de supervisión e incorpore, además, un modelo de relación óptimo entre servicios y un modelo de comunicación, dirigido tanto a los agentes propios del sector como al resto de la sociedad.

Como parte de este objetivo, la implantación eficiente del marco normativo actual y desarrollo de la normativa futura, se han establecido tres líneas estratégicas que responden a los distintos ámbitos de adecuación de las iniciativas.

E1. Implantación del marco normativo actual y desarrollo de la normativa futura

E1L1. Seguridad aérea

La primera línea incluye iniciativas y actividades enfocadas al desarrollo de Medios Aceptables de Cumplimiento (AMC) y Material Guía (GM) para el cumplimiento con los requisitos establecidos en el Real Decreto de RPAS. Asimismo, dicha línea incorpora iniciativas relacionadas con la definición de procesos de inspección, coordinación, comunicación o acceso a la información aeronáutica. Finalmente, la línea estratégica tiene en cuenta la participación activa en la definición de las políticas y regulaciones de alcance europeo.

E1L2. Protección de los enlaces de comunicaciones

La segunda línea, incluye iniciativas y actuaciones orientadas a la utilización eficiente del espectro radioeléctrico evitando, entre otras cuestiones, posibles interferencias a otros usuarios y asegurar que los enlaces de comunicaciones son seguros.

Finalmente, como parte del desarrollo normativo, se considera esencial la elaboración de una guía específica para la captura y tratamiento de los datos obtenidos a través de drones, con objeto de asegurar la privacidad de los ciudadanos.

E1L3. Protección de los derechos individuales



Eje estratégico 2: Impulso al desarrollo empresarial y a la I+D+i del sector

En materia de innovación, el Ministerio de Fomento ha elaborado el Plan de Innovación para el Transporte y las Infraestructuras que materializa una apuesta ambiciosa para consolidar a España en una posición de liderazgo internacional en dichas materias a través de la innovación, con el usuario final como centro del proceso y con la participación de toda la sociedad. En el ámbito de los drones, dicho Plan ha tenido en cuenta iniciativas orientadas a la creación de un Laboratorio destinado al desarrollo de nuevas aplicaciones para drones y al desarrollo de una Plataforma para la gestión del tráfico de estas aeronaves. Dichas iniciativas se han incluido en el presente Plan Estratégico.

Adicionalmente este Plan Estratégico incorporará iniciativas que tienen como objetivo, entre otras cuestiones, la incorporación de estas plataformas a la actividad productiva y social, para lo que será fundamental el desarrollo empresarial del sector. Actualmente, el ámbito nacional de drones se caracteriza por una atomización de empresas que mayoritariamente son muy reducidas en tamaño y que se enfocan básicamente a actividades de fotografía y filmación.

Asimismo, se considera conveniente estandarizar la oferta formativa de forma que las empresas puedan contar con profesionales altamente cualificados con capacidad para desarrollar soluciones tecnológicas adaptadas a las demandas del sector.

E2. Impulso al desarrollo empresarial y a la I+D+i del sector

E2L1. Desarrollo empresarial

La primera línea estratégica, relativa al desarrollo empresarial tiene en cuenta, entre otras iniciativas, la elaboración y potenciación de un currículo estándar para la formación de alta cualificación en materia de drones o el desarrollo de un centro de excelencia en materia de drones. Asimismo, tiene en cuenta el impulso de la utilización de drones en las distintas áreas

E2L2. Fomento I+D+i

de la Administración y sus empresas, como agentes tractores de la actividad.

Finalmente, como parte de este eje estratégico, se define otra línea estratégica que incluye todas las acciones relacionadas con la promoción y el apoyo en la financiación de tareas de I+D+i.

Teniendo en cuenta que se trata de un sector altamente innovador y competitivo en el ámbito internacional, es importante crear un entorno que favorezca el crecimiento sólido de las empresas españolas y su posicionamiento en los mercados globales. De esta forma, se debe trabajar en iniciativas enfocadas a facilitar la financiación de las empresas, impulsar su internacionalización y crear un tejido de conocimiento en toda la cadena de valor del sector. Aquí, el ICEX y algunas líneas contempladas en el Plan de Internacionalización del Transporte y las Infraestructuras 2018-2020, elaborado por el Ministerio de Fomento, desempeñarán un rol fundamental.

En materia de financiación, es un firme propósito del Ministerio de Fomento apoyar al sector para que pueda acceder a fuentes de financiación que permitan su desarrollo, entre otras, las provenientes de fondos europeos como H2020, CEF (Connecting Europe Facility), etc.; así como otras de ámbito nacional como ayudas a la iniciativa Industria conectada 4.0, programas Neotec, etc.

El impulso al desarrollo empresarial del sector debe también apoyarse en la potenciación de las tareas de I+D+i en las empresas. Para ello, la Administración asumirá un papel destacado como agente promotor, a través del fomento de la innovación y el desarrollo de nuevas aplicaciones.



Eje estratégico 3: Divulgación de información sobre el sector

El nuevo marco regulatorio recientemente aprobado, hace necesario reforzar la difusión entre los agentes del sector. Para ello, se considera imprescindible definir este eje estratégico, con objeto de que esta información global sobre el sector sea difundida entre la ciudadanía y se creen vías de comunicación con la Administración, favoreciendo tanto el desarrollo seguro de la actividad como la aceptación social del sector.

A su vez, cabe destacar que la diversidad de los usuarios de drones hace que exista una importante heterogeneidad en la formación aeronáutica de los mismos. Especialmente para aquellos usuarios con una menor formación en esta materia, se considera necesario promover la difusión de información que se oriente hacia una mayor especialización.

Para que exista un canal único en el que los agentes involucrados puedan acceder a la información de

una manera homogénea, este plan ha incluido entre sus iniciativas, la creación de un Portal para la Difusión del Sector. Parte de la información del Portal se apoyará en un Observatorio sobre el sector de los drones, responsable de recopilar, gestionar y analizar la información de este segmento de actividad y que se creará como otra iniciativa del presente Plan Estratégico.

Finalmente, se difundirá la labor innovadora de las empresas españolas, premiando su desempeño a través de la creación de un premio específico de la Fundación Enaire.

Las líneas que se han incorporado como parte de este eje estratégico tienen en cuenta, por un lado, la divulgación al público general y por otro, la divulgación en los sectores productivos.

E3. Divulgación de información sobre el sector

E3L1. Divulgación global

La primera línea estratégica, la divulgación global, tiene en cuenta la participación activa en foros y congresos del sector de drones y conferencias informativas en universidades o colegios. Asimismo, considera relevante el fomento de la cultura aeronáutica a través de material divulgativo de apoyo y la coordinación de campañas de divulgación con las autoridades locales.

E3L2. Divulgación en sectores productivos

En relación con la segunda línea, la divulgación en sectores productivos, cobrarán especial importancia los desarrollos relativos al Portal para la difusión del sector y el Observatorio del sector de drones.





Eje estratégico 4: Coordinación entre Administraciones

El conjunto de retos y ejes estratégicos planteados hasta ahora involucra a los diversos agentes del sector, siendo, por tanto, necesaria una gestión adecuada de su coordinación.

Con objeto de promover el desarrollo de la industria de los drones en España y coordinar a los distintos organismos públicos implicados en sus operaciones, se ha creado un Grupo Interministerial, liderada por la Dirección General de Aviación Civil del Ministerio de Fomento.

Este Plan tiene en cuenta la potenciación de este Grupo como instrumento esencial de coordinación de la actividad en materia de drones en España. Bajo este cuarto eje estratégico, se crearán asimismo foros de diálogo entre administraciones para el cumplimiento del conjunto de iniciativas del Plan Estratégico.

Todas las iniciativas orientadas a la coordinación entre administraciones se engloban dentro de este cuarto eje de naturaleza transversal.

E4. Coordinación entre Administraciones

E4L1. Coordinación

Esta línea estratégica da respuesta a la necesidad de una coordinación eficaz entre administraciones que permita el desarrollo ordenado del sector, esta-

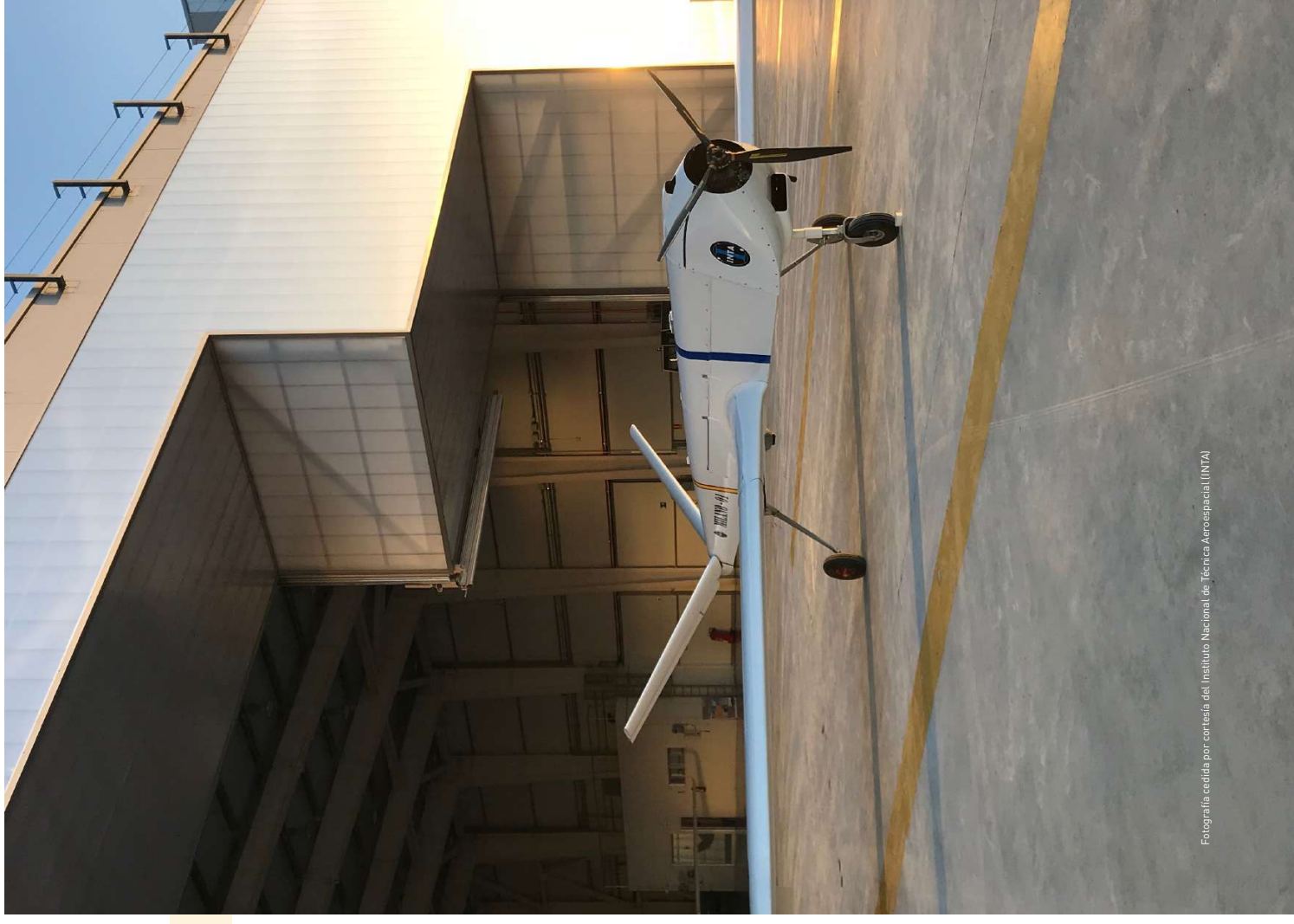
bleciéndose los foros de diálogo adecuados en los que coordinar las distintas iniciativas de las que los organismos involucrados en las mismas sean participantes.



El cumplimiento de los cuatro Ejes estratégicos definidos permitirá afrontar con éxito los retos identificados en el análisis, y de esta forma situar a España como un actor relevante en el panorama internacio-

nal en el sector. Es por tanto que dichos ejes son la guía fundamental sobre la que se establecen las diferentes líneas estratégicas e iniciativas del presente Plan Estratégico.

Fotografía cedida por cortesía del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA)



5. Iniciativas

De acuerdo al análisis realizado, los Ejes Estratégicos definidos constituyen una respuesta global a los objetivos establecidos en el plan.

Para la consecución de cada uno de los cuatro Ejes, se definen una serie de iniciativas. Estas se presentan en formato de fichas para facilitar su análisis, comprensión y seguimiento.

Cada una de las iniciativas persigue un objetivo específico e indica las acciones y proyectos a poner

en marcha. Se identifica, además, el horizonte para la implementación de las iniciativas y se incluye un presupuesto estimado de ejecución. Asimismo, se identifica al agente responsable de cada una de las iniciativas y a otros agentes involucrados en el desarrollo de las mismas.

El responsable de la iniciativa se corresponde con el agente de mayor implicación en la misma. Este debe asumir la labor de coordinación de los diferentes agentes involucrados y de las actuaciones. Asimismo, debe desarrollar y elevar informes de seguimiento al Comité de Evaluación y Seguimiento.

El seguimiento de las acciones debe efectuarse de forma continua a lo largo de la implantación del Plan, permitiendo medir y controlar la evolución y el desarrollo de las iniciativas; pudiendo corregir y subsanar posibles carencias mediante la modificación o aprobación de nuevas metas a partir de los resultados obtenidos.

Para poder llevar a cabo dicho seguimiento, cada una de las iniciativas incorpora una serie de indicadores de resultados, que serán evaluables a lo largo del tiempo. Estos indicadores se han identificado con el requisito de ser relevantes para diagnosticar

el estado real de las iniciativas, guardando, por lo tanto, una relación directa sobre el concepto valorado. Los indicadores de seguimiento son, asimismo, cuantificables, fáciles de establecer y utilizar. Son comparables en el tiempo, lo que permite identificar la evolución del concepto valorado.

En cualquier caso, se trata de una lista abierta que deberá adaptarse a las necesidades de reorientación de objetivos y metas, y de las propias exigencias del proceso de seguimiento y evaluación.



Ejes Estratégicos	Iniciativa	Horizonte		
		2018	2019	2020 2021

 E1. Implantación del marco normativo actual y desarrollo de la normativa futura	E1L1-1	Desarrollo de Medios de Cumplimiento y Material Guía para fabricantes, centros de formación y operadores	●	●	○	○
	E1L1-2	Desarrollo de medios electrónicos para la gestión de operaciones	●	●	●	○
	E1L1-3	Plan de inspecciones para drones, centros de formación y operadores	●	●	●	●
	E1L1-4	Desarrollo de procedimientos para facilitar el acceso a la información aeronáutica	●	○	○	○
	E1L1-5	Participación activa en la definición de las políticas y regulaciones comunitarias	●	●	●	●
	E1L1-6	Participación activa en la definición de los estándares U-Space	●	●	●	○
	E1L2-1	Desarrollo de Medios de Cumplimiento y Material Guía para protección de comunicaciones	●	●	○	○
	E1L2-2	Plan de inspecciones para equipos radioeléctricos de drones	●	●	●	●
	E1L2-3	Participación activa en la definición del espectro radioeléctrico disponible	○	●	○	○
	E1L3-1	Desarrollo de guía para la captura y tratamiento de datos obtenidos mediante drones	●	○	○	○

 E3. Divulgación de información sobre el sector	E3L1-1	Creación del portal digital para la difusión del sector	●	●	○	○
	E3L1-2	Acciones divulgativas del sector	●	●	●	●
	E3L1-3	Divulgación de buenas prácticas para la protección de la privacidad y el derecho a la intimidad de terceras personas	●	○	○	○
	E3L1-4	Reconocimiento público a la innovación	○	●	●	●
	E3L2-1	Desarrollo de un Observatorio del sector de drones	●	●	●	●
	E3L2-2	Divulgación sobre las vías de financiación del sector	●	●	●	●

Ejes Estratégicos	Iniciativa	Horizonte		
		2018	2019	2020 2021


E2.
 Impulso al desarrollo empresarial y a la I+D+i del sector

E2L1-1	Impulso del papel de la Administración para el desarrollo del sector	●	●	●
E2L1-2	Promoción de las exportaciones de las empresas españolas	●	●	●
E2L1-3	Apoyo a la financiación a la I+D+i de las empresas del sector	●	●	●
E2L1-4	Desarrollo de un currículum estándar	○	●	○
E2L2-1	Plan de Acción Nacional para la implantación U-Space	●	●	○
E2L2-2	Desarrollo de un centro de excelencia en materia de drones	●	●	○
E2L2-3	Potenciación de la red de infraestructuras especializadas para I+D+i en drones	●	●	○
E2L2-4	Potenciación de los centros tecnológicos	●	●	●
E2L2-5	Fomento de nuevos modelos de negocio de gran impacto	●	●	●
E2L2-6	Impulso a la integración de los drones en las smart cities	●	●	○
E2L2-7	Desarrollo de contramedidas para prevenir actos ilícitos	●	●	●


E4.
 Coordinación entre Administraciones

E4L1-1	Impulso del Grupo Interministerial	●	●	●
E4L1-2	Desarrollo de un Foro de diálogo interadministrativo	●	●	●

Anexo II. Implementación en CPLEX Studio de los Modelos Matemáticos

Implementación en CPLEX Studio del Modelo 3.3

```
/******  
* OPL 12.6.0.0 Model  
* Author: José Luis López Ramón  
* Creation Date: 2018  
*****/  
int C=...; range cust = 1..C; //Conjunto de C clientes  
range V0 = 0..C; //Conjunto de nodos origen de la red  
range VF= 1..C+1; //Conjunto de nodos finales de la red  
int M=...; range K=1..M; //Conjunto de M drones  
range V=0..C+1; //Conjunto de todos los nodos  
  
//Parámetros  
float Q[K]=...; //Llamada a datos de capacidad de los drones  
float S[K]=...; //Llamada a datos de velocidad de los drones  
float c[V0][VF]=...; //Llamada a datos de distancia entre nodos  
float d[cust]=...; //Llamada a datos de demanda de clientes  
  
//Variables de Decisión  
dvar boolean x[V0][VF][K]; //Xijk: el dron k va de i a j  
dvar boolean y[cust][K]; //Yik: el cliente i es visitado por el dron k  
dvar float+ u[V]; //Variable para la eliminación de subtours  
  
//Función Objetivo (Minimizar el tiempo de la ruta)  
minimize (sum(i in V0) sum(j in VF) sum(k in K) (c[i][j]/S[k])*x[i][j][k]);  
  
//Restricciones
```

```

subject to {

/*Todos los clientes son atendidos , entrando y saliendo a su localidad
si el dron la visita*/
    forall(i in cust , k in K){
        sum(j in VF) x[i][j][k]==y[i][k];
        sum(j in V0) x[j][i][k]==y[i][k]
    }

/*Se visita con un solo dron*/
    forall(i in cust)
        sum(k in K)y[i][k]==1;

/*El dron no puede entrar al depósito si ya se encuentra allí*/
    forall(k in K)
        x[0][C+1][k]==0;

/*No se debe superar la capacidad máxima*/
    forall(k in K)
        sum(i in cust) d[i]*y[i][k] <= Q[k];

/*Eliminación de subtours*/
    forall(i in V0, j in VF, k in K)
        u[i]- u[j] + (C+1)*x[i][j][k] <= C;

/*Desigualdad válida: si un vehículo está activado sale del almacén*/
    forall(k in K)
        sum(i in cust)y[i][k]<= C*sum(i in cust) x[0][i][k];

/*Desigualdad valida: si un dron no sale , no puede regresar al depósito*/
    forall(k in K)
        sum(i in cust)x[i][C+1][k]<=sum(i in cust) x[0][i][k];
}

```

Implementación en CPLEX Studio del Modelo 3.4

```

/*****
* OPL 12.6.0.0 Model
* Author: José Luis López Ramón
* Creation Date: 2018
*****/
int C=...; range cust = 1..C; //Conjunto de C clientes
range V0 = 0..C;             //Conjunto de nodos origen de la red
range VF= 1..C+1;            //Conjunto de nodos finales de la red
int M=...; range K=1..M;     //Conjunto de M drones

```

```

range V=0..C+1;                                //Conjunto de todos los nodos

//Parámetros
float Q[K]=...;                                //Llamada a datos de capacidad de los drones
float S[K]=...;                                //Llamada a datos de velocidad de los drones
float c[V0][VF]=...;                           //Llamada a datos de distancia entre nodos
float d[cust]=...;                             //Llamada a datos de demanda de clientes

//Variables de Decisión
dvar boolean x[V0][VF][K];                     //Xijk: el dron k va de i a j
dvar boolean y[cust][K];                       //Yik: el cliente i es visitado por el dron k
dvar float+ u[V];                             //Variable para la eliminación de subtours

//Función Objetivo (Minimizar el tiempo de la ruta)
minimize (sum(i in V0) sum(j in VF) sum(k in K) (c[i][j]/S[k])*x[i][j][k]);

//Restricciones
subject to {

/*Todos los clientes son atendidos, entrando y saliendo a su localidad
si el dron la visita*/
    forall(i in cust, k in K){
        sum(j in VF) x[i][j][k]==y[i][k];
        sum(j in V0) x[j][i][k]==y[i][k]
    }

/*Se visita con un solo dron*/
    forall(i in cust)
        sum(k in K)y[i][k]==1;

/*El dron no puede entrar al depósito si ya se encuentra allí*/
    forall(k in K)
        x[0][C+1][k]==0;

/*No se debe superar la capacidad máxima*/
    forall(k in K)
        sum(i in cust) d[i]*y[i][k] <= Q[k];

/*Eliminación de subtours*/
    forall(i in V0, j in VF, k in K)
        u[i]- u[j] + (C+1)*x[i][j][k] <= C;

/*Desigualdad válida: si un vehículo está activado sale del almacén*/
    forall(k in K)
        sum(i in cust)y[i][k]<= C*sum(i in cust) x[0][i][k];

```

```

/*Desigualdad valida: si un dron no sale, no puede regresar al depósito*/
forall(k in K)
    sum(i in cust)x[i][C+1][k]<=sum(i in cust) x[0][i][k];

/*No se rebasa la batería*/
forall(k in K)
    sum(i in V0, j in VF) e[i][j]*x[i][j][k] <= B;
}

```

Implementación en CPLEX Studio del Modelo 3.5

```

/*****
* OPL 12.6.0.0 Model
* Author: José Luis López Ramón
* Creation Date: 2018
*****/
int C=...; range cust = 1..C; //Conjunto de C clientes
range V0 = 0..C; //Conjunto de nodos origen de la red
range VF= 1..C+1; //Conjunto de nodos finales de la red
int M=...; range K=1..M; //Conjunto de M drones
range V=0..C+1; //Conjunto de todos los nodos

//Parametros
float Q[K]=...; //Llamada a datos de capacidad de los drones
float S[K]=...; //Llamada a datos de velocidad de los drones
float B[K]=...; //Llamada a datos de capacidad de la batería
float TR=...; //Llamada a datos de tiempo de recarga
float c[V0][VF]=...; //Llamada a datos de distancia entre nodos
float d[cust]=...; //Llamada a datos de demanda de clientes
float e[V0][VF]=...; //Llamada a datos de consumo de batería
int RC[cust]=...; //Llamada a datos de disponibilidad de recarga

//Variables de Decisión
dvar boolean x[V0][VF][K]; //Xijk: el dron k va de i a j
dvar boolean y[cust][K]; //Yik: el cliente i es visitado por el dron k
dvar float+ u[V]; //Variable para la eliminación de subtours
dvar float+ bl[VF][K]; //Batería restante al llegar al nodo
dvar float+ bs[V0][K]; //Batería restante al salir del nodo
dvar boolean f[V0][K]; //Fik: el dron k recarga en el nodo i
dvar float+ s[V0][VF][K]; //V.Auxiliar para evitar la no linealidad
dvar float+ t[cust][K]; //V.Auxiliar para evitar la no linealidad

//Función Objetivo (Minimizar el tiempo de la ruta)
minimize (sum(i in V0) sum(j in VF) sum(k in K) (c[i][j]/S[k])*x[i][j][k])+

```

```

sum(i in V0,k in K) f[i][k]*TR;

//Restricciones
subject to {

/*Todos los clientes son atendidos , entrando y saliendo a su localidad
si el dron la visita*/
    forall(i in cust , k in K){
        sum(j in VF) x[i][j][k]==y[i][k];
        sum(j in V0) x[j][i][k]==y[i][k]
    }

/*Se visita con un solo dron*/
    forall(i in cust)
        sum(k in K)y[i][k]==1;

/*El dron no puede entrar al depósito si ya se encuentra allí*/
    forall(k in K)
        x[0][C+1][k]==0;

/*No se debe superar la capacidad máxima*/
    forall(k in K)
        sum(i in cust) d[i]*y[i][k] <= Q[k];

/*Eliminación de subtours*/
    forall(i in V0, j in VF, k in K)
        u[i]- u[j] + (C+1)*x[i][j][k] <= C;

/*Desigualdad válida: si un vehículo está activado sale del almacén*/
    forall(k in K)
        sum(i in cust)y[i][k]<= C*sum(i in cust) x[0][i][k];

/*Desigualdad valida: si un dron no sale , no puede regresar al depósito*/
    forall(k in K)
        sum(i in cust)x[i][C+1][k]<=sum(i in cust) x[0][i][k];

/*No se rebasa la batería*/
    forall(k in K)
        sum(i in V0, j in VF) e[i][j]*x[i][j][k] <= B[k];

/*Si un dron sale del almacén sale cargado , si un dron no sale del almacén
no sale cargado*/
    forall (k in K) {
        f[0][k]>= sum(i in cust) x[0][i][k];
        bs[0][k]<=B[k]*sum(i in cust) x[0][i][k];
    }

```

```

        bs[0][k] >= B[k] * f[0][k];
    }

/*Un dron no se puede recargar en un nodo que no visita o no tiene estación*/
    forall (k in K, i in cust){
        f[i][k] <= RC[i];
        f[i][k] <= y[i][k];
    }

/*Si un dron no visita i, la variables son 0...
    forall(k in K, i in cust){
        bs[i][k] <= B[k] * y[i][k];
        bl[i][k] <= B[k] * y[i][k];
    }

//...en un cliente cualquiera cuando se visita*/
    forall(k in K, i in cust){
        bs[i][k] == B[k] * f[i][k] + t[i][k];
        t[i][k] <= bl[i][k] + f[i][k] * B[k];
        t[i][k] >= bl[i][k] - f[i][k] * B[k];
        t[i][k] <= (1 - f[i][k]) * B[k];
    }
    forall(k in K, i in VF)
        bl[i][k] == sum(j in V0) (s[j][i][k] - e[j][i] * x[j][i][k]);

/*Determinar el valor de las variables s*/
    forall(j in V0, i in VF, k in K){
        s[j][i][k] <= bs[j][k] + (1 - x[j][i][k]) * B[k];
        s[j][i][k] >= bs[j][k] - (1 - x[j][i][k]) * B[k];
        s[j][i][k] <= B[k] * x[j][i][k];
    }
}

```

Ejemplo de fichero de parámetros de entrada

```

*****
* OPL 12.6.0.0 Data
* Author: José Luis López Ramón
* Creation Date: 2018
*****/
C = 14;                //Numero de clientes
M = 5;                 //Numero de drones
Q=[195 50 50 50 50];  //Capacidad de los drones en kg
S=[72 60 60 60 60];   //Velocidad de los drones en km/h
B=[172 180 180 180 180]; // Autonomía de los drones en km

```

```

d=[30.9 30.4 18.1 12.7 87.2 14.2 3.9 33.3 16.7 31.9 9.3
    45.6 32.8 25.5];          //Demanda de los habitantes en kg

//Distancia entre nodos en km

c=[[ 11.16 18.67 26.46 27.79 34.62 34.42 34.77 28.47 26.18 29.96 33.18
    28.19 20.50 15.91 0 ]
 [ 0.00 8.07 15.37 17.00 23.59 23.27 23.68 17.50 16.25 19.98 23.42 19.83
    14.17 5.57 11.16 ]
 [ 8.07 0.00 8.22 9.11 16.07 16.89 17.73 12.61 14.57 17.51 20.88 20.21
    17.69 7.57 18.67 ]
 [ 15.37 8.22 0.00 3.40 8.26 8.78 9.84 6.53 11.89 13.33 16.03 18.23 19.34
    12.17 26.46 ]
 [ 17.00 9.11 3.40 0.00 7.20 9.87 11.31 9.51 15.28 16.54 19.09 21.62 22.58
    14.66 27.79 ]
 [ 23.59 16.07 8.26 7.20 0.00 5.67 7.47 10.36 16.97 16.59 18.11 22.78
    26.15 20.31 34.62]
 [ 23.27 16.89 8.78 9.87 5.67 0.00 1.91 6.77 12.83 11.62 12.72 18.03 22.67
    18.95 34.42 ]
 [ 23.68 17.73 9.84 11.31 7.47 1.91 0.00 6.50 11.94 10.27 11.04 16.72
    21.92 19.08 34.77 ]
 [ 17.50 12.61 6.53 9.51 10.36 6.77 6.50 0.00 6.62 7.07 9.65 12.65 16.03
    12.65 28.47 ]
 [ 16.25 14.57 11.89 15.28 16.97 12.83 11.94 6.62 0.00 3.79 7.16 6.34
    10.02 10.94 26.18 ]
 [ 19.98 17.51 13.33 16.54 16.59 11.62 10.27 7.07 3.79 0.00 3.52 6.46
    12.86 14.57 29.96 ]
 [ 23.42 20.88 16.03 19.09 18.11 12.72 11.04 9.65 7.16 3.52 0.00 7.20
    15.03 17.87 33.18 ]
 [ 19.83 20.21 18.23 21.62 22.78 18.03 16.72 12.65 6.34 6.46 7.20 0.00
    8.43 14.93 28.19 ]
 [ 14.17 17.69 19.34 22.58 26.15 22.67 21.92 16.03 10.02 12.86 15.03 8.43
    0.00 10.43 20.50 ]
 [ 5.57 7.57 12.17 14.66 20.31 18.95 19.08 12.65 10.94 14.57 17.87 14.93
    10.43 0.00 15.91 ]];

//Consumo de batería entre nodos en km

e=[[ 11.16 18.67 26.46 27.79 34.62 34.42 34.77 28.47 26.18 29.96 33.18
    28.19 20.50 15.91 0 ]
 [ 0.00 8.07 15.37 17.00 23.59 23.27 23.68 17.50 16.25 19.98 23.42 19.83
    14.17 5.57 11.16 ]
 [ 8.07 0.00 8.22 9.11 16.07 16.89 17.73 12.61 14.57 17.51 20.88 20.21
    17.69 7.57 18.67 ]
 [ 15.37 8.22 0.00 3.40 8.26 8.78 9.84 6.53 11.89 13.33 16.03 18.23 19.34

```



```

12.17 26.46 ]
[ 17.00 9.11 3.40 0.00 7.20 9.87 11.31 9.51 15.28 16.54 19.09 21.62 22.58
14.66 27.79 ]
[ 23.59 16.07 8.26 7.20 0.00 5.67 7.47 10.36 16.97 16.59 18.11 22.78
26.15 20.31 34.62]
[ 23.27 16.89 8.78 9.87 5.67 0.00 1.91 6.77 12.83 11.62 12.72 18.03 22.67
18.95 34.42 ]
[ 23.68 17.73 9.84 11.31 7.47 1.91 0.00 6.50 11.94 10.27 11.04 16.72
21.92 19.08 34.77 ]
[ 17.50 12.61 6.53 9.51 10.36 6.77 6.50 0.00 6.62 7.07 9.65 12.65 16.03
12.65 28.47 ]
[ 16.25 14.57 11.89 15.28 16.97 12.83 11.94 6.62 0.00 3.79 7.16 6.34
10.02 10.94 26.18 ]
[ 19.98 17.51 13.33 16.54 16.59 11.62 10.27 7.07 3.79 0.00 3.52 6.46
12.86 14.57 29.96 ]
[ 23.42 20.88 16.03 19.09 18.11 12.72 11.04 9.65 7.16 3.52 0.00 7.20
15.03 17.87 33.18 ]
[ 19.83 20.21 18.23 21.62 22.78 18.03 16.72 12.65 6.34 6.46 7.20 0.00
8.43 14.93 28.19 ]
[ 14.17 17.69 19.34 22.58 26.15 22.67 21.92 16.03 10.02 12.86 15.03 8.43
0.00 10.43 20.50 ]
[ 5.57 7.57 12.17 14.66 20.31 18.95 19.08 12.65 10.94 14.57 17.87 14.93
10.43 0.00 15.91 ]];

```

Anexo III. Especificaciones técnicas de los helicópteros no tripulados utilizados en la resolución de los modelos

En este anexo se incluyen las especificaciones técnicas de los dos modelos de helicópteros no tripulados utilizados para resolver los modelos matemáticos. Ya que de los drones multirrotor eléctricos solamente se tenía información consultable de manera online, esto es, los fabricantes no proporcionan una hoja de especificaciones, no han podido ser incluidos.

Scout B-330 UAV

Product Brochure Scout B-330 UAV Helicopter



Product Description



The Scout B-330 UAV helicopter is designed to carry payloads up to 50kg (110lbs) for at least three hours in a typical mission scenario. This includes a fully autonomous take-off sequence, a mission flight at variable speed, and a landing sequence. The mission can be a preprogrammed on the ground control station (GCS) or it can be continuously adapted by the operator.

Various safety features such as autonomous homing and automatic landing in case of link-loss as well as redundant backup links are part of the standard UAV helicopter system.



The Scout B-330 UAV helicopter is fully boarded and sealed to operate under dusty, rainy and humid conditions like in the mountains or offshore. The extremely stable flight behaviour in strong wind is crucial for perfect data acquisition of many sensor applications.

The development and production of the Scout B-330 UAV helicopter, located in Switzerland, is based on modern CAD tools and laser production technology and fulfills highest certification standards

Mission Scenarios



The Scout B-330 UAV helicopter can carry almost every payload up to 50kg (110lbs). In the following, two typical payload configurations are described. Aeroscout as a system integrator has more than 10 years of experience with the integration of highest grade sensor equipment on the well-known Scout B1-100 UAV helicopter.

Laser Scanning with the Riegl VP-1

Area covered [km ²]:	1	6	10
Flight Velocity [m/s]:	5	10	15
Flight Altitude [m AGL]:	50	80	100
Scanning Angle [deg]:	75	110	110
Point to Point Distance [cm]:	6	10	15
Line to Line Distance [cm]:	6	10	15
Points density [pts/m ²]:	300	100	50
Mission Duration [min]:	60	60	60
Data Size [GB]:	8	12	12
Photo overlay:	yes	yes	yes



Power Line Inspection

Carrying a multi sensor payload composed of:

- Laser scanner VUX-1
- Gimbal mounted Corona camera
- Gimbal mounted high resolution photo camera
- Infrared camera for orthophoto (looking downwards)
- High definition video live stream

This results in a total payload weight of approx. 20kg (44lbs). The excess power allows power line inspection above 2000m AMSL under heavy wind conditions.

Datasheet



Feature	Value
Dimensions, length, width, height	420 x 104 x 120cm
Maximum take-off weight MTOW	140kg
Engine (gasoline, heavy fuel optional)	21kW (28HP)
Typical payload at 500m above mean sea level (AMSL)	30kg (66lbs)
Maximum payload at 500m above mean sea level (AMSL)	50kg (110lbs)
Service ceiling (AMSL) with reduced payload of 13kg	3050m (10000ft)
Endurance with maximum payload	3h
Maximum horizontal velocity	100km/h (54kn)
Maximum rate of climb at MTOW and 500m AMSL	7m/s (1370 ft/min)
Internal fuel tank (95 Octane gasoline)	15L
Onboard power generator for payload	1500W
Lifespan (true flight time)	2000h
Small maintenance interval (true flight time)	100h
Big maintenance interval (true flight time)	300h
Operating temperature	-10°C to 40°C



www.dragonflypictures.com

Tel 610-521-6115 ext. 202

DP-14 Hawk

430 Lbs Payload Tactical UAV

VTOL: No Runway Required

Specifications



Modular configurations



External hard points for oversized items

DP-14 Hawk

Payload: 430 lbs

Speed: 105 KTAS

Cruise speed: 72 KTAS

Rapid climb under load:
500 ft / minute

Stall speed: None

Stable hover: Yes

Crosswinds: 40 kts

Altitude: 15,000 ft

Our UAV are military-proven and have successfully flown thousands of hours. They are now available for industry.

* Requires additional technology



DP-14 Hawk, 430 lbs payload, Internal cargo area 23 cubic feet

DPI is the industry leader in rotary wing unmanned aerial vehicles (UAV) in the U.S. The DPI DP-14 Hawk is a vertical take-off/land (VTOL) UAV that carries up to 430 lbs internal payload. The internal cargo area is 23 cubic feet in size, over 6 ft long, and over 20 inches wide. The Hawk's tandem configuration permits fast, agile aerial delivery and haul back with precision flight, self-deploy and self-recover, and precision drops (better than 3 meters) in unprepared, complex terrain. Onboard LIDAR and powerful computers perform efficient path planning and intelligent landing-site selection. Use of a relative positioning system allows the DP-14 Hawk to self-launch and self-recover on heaving, rolling, pitching ships with 8-inch accuracy CEP.*

Performance

Model	DP-14-T62
Hybrid heavy fuel engine	Solar T62
Fuel	JP-5 or JP-8
Power	80 Hp
Electric generator	4.5 kW
Gross weight	900 lbs
Empty weight	500 lbs
Payload volume	23 cubic feet
Internal fuel capacity	39.3 gal (270 lbs)
External fuel capacity	30 gal (130 lbs)

Increase range:

Trade payload for fuel to optimize endurance for your application



www.dragonflypictures.com

Tel 610-521-6115 ext. 202

DP-14 Hawk

430 Lbs Payload Tactical UAV

VTOL: No Runway Required

Specifications



Fits in utility trailer or standard van

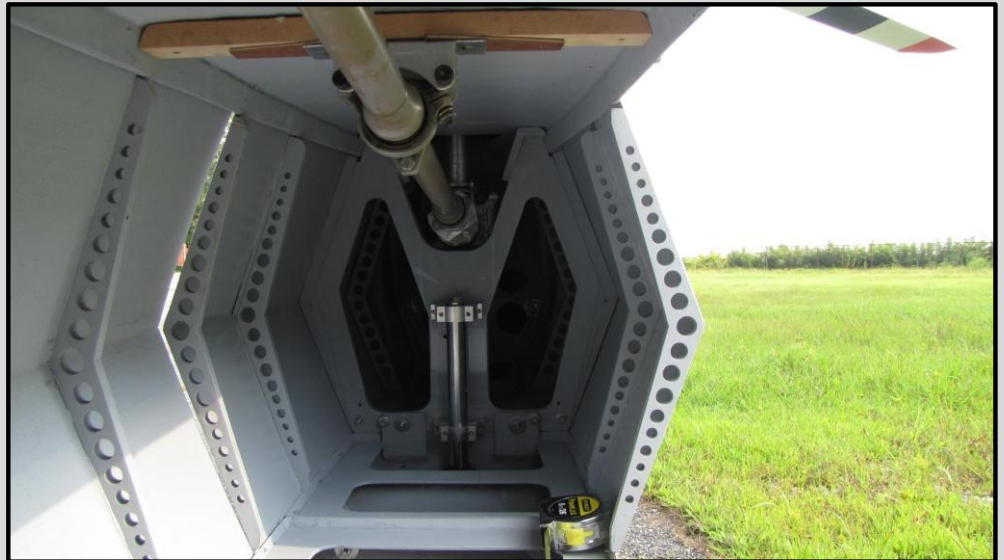


Add fuel to increase range, endurance

DP-14 Hawk

- Deploy in 15 minutes
- User-friendly waypoint navigation
- Simple, one-person operation
- No runway required
- Hand off control to a remote team
- Onboard processing for real-time, high-bandwidth imagery, data
- User-defined lost link protocols
- Detailed aircraft status

† Other options available.



Carrying cargo inside the aircraft allows for fast, agile flight even under load — up to 50% faster than a comparable sling-loaded aircraft.

Airframe Specifications

Model	DP-14
Gear type	Fixed/wheeled†
Fuselage length	13.5 ft
Fuselage width	24 inches
Minimum rotor height	66 inches
Rotor diameter	13 feet
Rotor separation	8 feet

Endurance with typical payloads

- 2.4 hours, 430 lbs payload
- 4.3 hours, 100 lbs payload

Sensors and Capabilities

LIDAR, IMU, GPS	Yes
Ultrasonic rangefinder	Yes
Nap of earth (NOE) flight	Yes
NLOS operation	Yes

Communication Package

Iridium Satcomm†	Yes
Encrypted communications	Yes



Learn more:

www.dragonflypictures.com

www.youtube.com/dragonflypicturesinc

600 West End of 2nd Street Essington, PA 19029

Info@dragonflypictures.com